Guide sur les possibilités d'accroître l'efficacité énergétique dans l'industrie de la transformation des viandes et volailles, des boissons et de la transformation du lait

Préparé par :

Ressources naturelles Canada
Centre de la technologie de l'énergie de CANMET - Varennes

et

Agence de l'efficacité énergétique du Québec

105-06795/

AVIS AU LECTEUR

Ceci n'est pas la version définitive de ce document. De plus, la présente publication n'est diffusée uniquement qu'à titre d'information. Ni le Gouvernement du Canada, ni ses ministres, agents, employés ou mandataires ne donnent de garantie à l'égard de ce guide et n'assument aucune responsabilité relativement à l'exactitude de l'information, à son contenu, à son usage ou aux dommages résultants de son utilisation.

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS 1

A. SOMMAIRE EXÉCUTIF 5

B. PROFILS ÉCONOMIQUES ET ÉNERGÉTIQUES SECTORIELS 10

B.1. **L'industrie canadienne des aliments et boissons** 10
B.1.1. L'utilisation de l'eau dans l'industrie des aliments et boissons 11

B.2. **L'industrie canadienne des viandes et volailles** 12
B.2.1. L'industrie des viandes rouges 13
B.2.2. L'industrie des volailles 14
B.2.3. L'utilisation de l'eau dans l'industrie des viandes et volailles 15

B.3. **L'industrie canadienne des boissons** 16
B.3.1. L'industrie brassicole 16
B.3.2. L'industrie des boissons douces 18
B.3.3. L'utilisation de l'eau dans l'industrie des boissons 19

B.4. **L'industrie canadienne de la transformation du lait** 20
B.4.1. L'utilisation de l'eau dans l'industrie de la transformation du lait 22

C. PRINCIPALES ÉTAPES DE FABRICATION 24

C.1. **L'industrie des viandes et volailles** 24
C.1.1. Abattage et transformation de porcs 24
C.1.2. Abattage et transformation de bovins 25
C.1.3. Abattage et transformation de poulets 26

C.2. **L'industrie des boissons** 27
C.2.1. Bière 27
C.2.2. Boissons douces 28

C.3. **L'industrie de la transformation du lait** 29
C.3.1. Lait de consommation 29
C.3.2. Produits laitiers de culture 30
C.3.3. Beurre et crème glacée 31
C.3.4. Fromage 32
C.3.5. Produits séchés ou évaporés 33

D. MESURES TRADITIONNELLES D'AMÉLIORATIONS DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE 36

D.1. **Motivation du personnel à l'économie d'énergie** 36

D.2. **Gestion de la consommation électrique** 38
D.2.1. Approvisionnement électrique 38
D.2.2. Moteurs 39
D.2.3. Éclairage 41

D.3. **Air comprimé** 43

D.4. **Chauffage, ventilation et climatisation (CVC)** 46

D.5. **Réfrigération et refroidissement** 49

D.6. **Production et distribution de vapeur** 54

D.7. Gestion de l'eau 59

E. NOUVELLES TECHNOLOGIES ÉCONERGÉTIQUES APPLICABLES DANS LES PROCÉDÉS DE FABRICATION 62

E.1. La filtration membranaire 62

E.2. Pasteurisation et contrôle bactérien à froid 63
E.2.1. Traitement par microfiltration et ultrafiltration 63
E.2.2. Traitement sous hautes pressions (hyperbare) 64
E.2.3. Traitement ultraviolet 64
E.2.4. Traitement par effets de champs électriques ou magnétiques 64
E.2.5. Traitement par faisceaux d'électrons 65

E.3. La pompe à chaleur (PAC) 65

E.4. Recompression mécanique de la vapeur (RMV) 65

E.5. Nouveaux modes de transfert thermique 66
E.5.1. L'infrarouge (IR) 66
E.5.2. Les micro-ondes (MO) et les hautes fréquences (HF) 67
E.5.3. Le chauffage ohmique 67
E.5.4. Le chauffage par induction 68

E.6. Valves d'homogénéisation à haute efficacité 68

E.7. Exemples d'applications industrielles 68
E.7.1. Industrie des viandes & volailles 69
E.7.2. Industrie des boissons 72
E.7.3. Industrie de la transformation du lait 74

F. MÉTHODES AVANCÉES D'OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE 78

F.1. Le "Monitoring & Targeting" 78
F.1.1. Le "Monitoring & Targeting" en pratique 79
F.1.2. Exemples d'application du "Monitoring & Targeting" 80

F.2. L'Intégration des Procédés "IP" 83
F.2.1. Un pas plus loin dans l'efficacité 83
F.2.2. Domaines d'application 84
F.2.3. L'analyse de pincement (Pinch) 84
F.2.4. L'Intégration des Procédés en pratique 85
F.2.5. Exemples d'application des techniques d'Intégration des Procédés 88

ANNEXE 1 : UNITÉS ET FACTEURS DE CONVERSION A-1

ANNEXE 2 : RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES A-5

COMMENT S'ORIENTER DANS CE GUIDE EN FONCTION DE SON SECTEUR

☞ Industrie des viandes & volailles

Profil sectoriel :	partie B.2
Principales étapes de fabrication :	partie C.1
Mesures d'efficacité énergétique :	
- mesures traditionnelles :	partie D
- nouvelles technologies éprouvées :	partie E.1 à E.5
- exemples d'application :	partie E.7.1
Méthodes avancées d'optimisation :	
- Monitoring & Targeting (M & T)	partie F.1
- Intégration des Procédés (IP)	partie F.2
Unités & facteurs de conversion :	Annexe 1
Références :	Annexe 2

☞ Industrie des boissons (bière & boissons douces)

Profil sectoriel :	partie B.3
Principales étapes de fabrication :	partie C.2
Mesures d'efficacité énergétique :	
- mesures traditionnelles :	partie D
- nouvelles technologies éprouvées :	partie E.1 à E.5
- exemples d'application :	partie E.7.2
Méthodes avancées d'optimisation :	
- Monitoring & Targeting (M & T)	partie F.1
- Intégration des Procédés (IP)	partie F.2
Unités & facteurs de conversion :	Annexe 1
Références :	Annexe 2

☞ Industrie de la transformation du lait

Profil sectoriel :	partie B.4
Principales étapes de fabrication :	partie C.3
Mesures d'efficacité énergétique :	
- mesures traditionnelles :	partie D
- nouvelles technologies éprouvées :	partie E.1 à E.6
- exemples d'application :	partie E.7.3
Méthodes avancées d'optimisation :	
- Monitoring & Targeting (M & T)	partie F.1
- Intégration des Procédés (IP)	partie F.2
Unités & facteurs de conversion :	Annexe 1
Références :	Annexe 2

Avant-Propos

Le présent guide sur les possibilités d'accroître l'efficacité énergétique dans l'industrie agroalimentaire est une initiative conjointe de Ressources naturelles Canada (RnCan) et de l'Agence de l'efficacité énergétique du Québec (AEE). Il a été rédigé par le Centre de la technologie de l'énergie de CANMET - Varennes de Ressources naturelles Canada avec le support technique d'Integra Process[1], entreprise spécialisée en ingénierie des procédés ainsi qu'en gestion de l'énergie dans l'industrie agroalimentaire.

Il vise à présenter les principales données économiques et énergétiques ainsi que les possibilités de réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre (GES) qui peuvent être mises en œuvre dans l'industrie agroalimentaire, plus particulièrement dans les secteurs suivants :

- **Industrie de la transformation des viandes et des volailles (CTI 101)**

- **Industrie des boissons gazeuses (CTI 1111) et de la bière (CTI 1131)**

- **Industrie de la transformation du lait (CTI 104)**

Évolution du système de Classification des Industries

Comme l'a annoncé Statistique Canada, un nouveau *Système de Classification des Industries de l'Amérique du Nord* (SCIAN) a été récemment instauré et est progressivement adopté. Toutefois, la plupart des données économiques et énergétiques publiées font encore référence à la *Classification Type des Industries* (CTI) de 1980 que nous avons conservé dans le cadre de ce document sous sa forme à 4 chiffres, soit le niveau le moins élevé d'agrégation industrielle.

On trouvera dans le tableau suivant la correspondance entre les nouveaux codes SCIAN et les codes CTI des secteurs de l'industrie agroalimentaire, objet du présent guide. L'astérisque * placé après le code signifie que d'autres codes CTI se rapportent également au code SCIAN (voir points 3 et 4 ci-dessous).

---

[1] Integra Process – 180 de Florimont, St-Hilaire, Québec, Canada, J3H 4C5 (M. Jacques Desroches)

CTI 1011 : Industrie de la viande et de ses produits (sauf volaille)	
Code SCIAN	**Description**
311611*	Abattage d'animaux, sauf les volailles
311614*	Fonte des graisses animales et transformation de la viande provenant de carcasses
CTI 1012 : Industrie des produits de la volaille	
Code SCIAN	**Description**
311615	Transformation de la volaille
CTI 1041 : Industrie du lait de consommation	
Code SCIAN	**Description**
311511	Fabrication du lait de consommation
CTI 1049 : Autres industries de produits laitiers	
Code SCIAN	**Description**
311511*	Fabrication du lait de consommation
311515*	Fabrication de beurre, de fromage et de produits laitiers secs et concentrés
311520*	Fabrication de crème glacée et de desserts congelés
CTI 1111 : Industrie des boissons gazeuses	
Code SCIAN	**Description**
311930*	Fabrication de sirops et de concentrés aromatisants
312110*	Fabrication de boissons gazeuses et de glace
312120*	Brasseries
CTI 1131 : Industrie de la bière	
Code SCIAN	**Description**
312120	Brasseries

Les deux types de classification ne correspondant pas rigoureusement au même degré d'agrégation industrielle, la correspondance entre les codes CTI et les codes SCIAN correspond, suivant les cas, à l'une des quatre solutions possibles suivantes (d'après Industrie Canada) :

1. Il y a des cas où tous les établissements sous un code CTI sont assignés à un seul code SCIAN. A titre d'exemple, tous les établissements sous le code *CTI 1012 "Industrie des produits de la volaille"* ont été assignés exclusivement au code *SCIAN 311615, "Traitement de la volaille"*.
2. Deuxièmement, il existe certains cas où des établissements sous un code CTI sont assignés à deux codes SCIAN ou plus. Il s'agit d'une situation courante étant donné qu'un des buts poursuivis en créant une nouvelle structure de codage était de fournir une structure de classification plus détaillée.
3. Il y a des cas où les établissements sous deux codes CTI ou plus ont été assignés à un seul code SCIAN, ce qu'on appelle un rapport de plusieurs à un.
4. Enfin, il existe de nombreux cas où l'association entre le code CTI et le code SCIAN est compliquée. Deux codes CTI ou plus peuvent correspondre à deux codes SCIAN ou plus. C'est ce qu'on appelle un rapport de plusieurs à plusieurs.

A. Sommaire exécutif

Le secteur des aliments et boissons est le deuxième plus important secteur manufacturier sur le plan des livraisons au Canada. Au Québec, dont l'industrie agroalimentaire n'est devancée que par celle de l'Ontario, il occupe même le premier rang comme dans plusieurs autres provinces canadiennes. Cette industrie est également un employeur important puisqu'en 1998 plus de 167 000 personnes travaillaient dans les quelques 3 800 établissements canadiens du secteur (environ 850 au Québec) dont la majorité est constituée de petites et moyennes entreprises produisant une multitude de produits.

La consommation énergétique du secteur s'élevait en 1998 à 29 050 GWh et les émissions de gaz à effet de serre (GES) correspondantes étaient de 3 800 kt. La facture énergétique se chiffrait à environ 880 millions de dollars et a connu une augmentation sensible au cours de la période 1998 - 2001 à cause de l'augmentation sensible du prix du gaz naturel.

L'identification, la collecte et la diffusion d'informations relatives aux différentes opportunités permettant de réduire la consommation énergétique sont de toute première importance. En effet, une entreprise qui améliore son efficacité énergétique retire des avantages financiers en réduisant sa facture énergétique et en augmentant ses bénéfices. Elle contribue également à l'effort collectif d'utilisation rationnelle des ressources naturelles et de réduction des émissions de gaz à effet de serre bénéficiant ainsi de l'image d'une entreprise consciente de ses responsabilités environnementales.

Ce guide vise à présenter les principales données économiques et énergétiques ainsi que les mesures d'efficacité énergétiques typiques qui peuvent être mises en œuvre dans l'industrie agroalimentaire et plus particulièrement dans les secteurs suivants[2] :

- **Industrie de la transformation des viandes et des volailles (CTI 101)**
- **Industrie des boissons gazeuses (CTI 1111) et de la bière (CTI 1131)**
- **Industrie de la transformation du lait (CTI 104)**

Le document intègre également certains aspects de la gestion de l'eau qui ne peuvent être complètement découplés des questions énergétiques puisque l'industrie agroalimentaire est grande consommatrice d'eau chaude.

Il porte aussi à la connaissance des intervenants du milieu agroalimentaire quelques innovations prometteuses en matière de procédés. Il présente enfin l'intérêt de méthodes avancées de gestion de l'énergie telles que l'Intégration des Procédés qui ne sont que brièvement mentionnées dans la plupart des études relatives à l'efficacité énergétique en milieu industriel mais qui conduisent en général à des réductions très importantes de la consommation énergétique.

[2] Les autres secteurs de l'industrie agroalimentaire, bien que non ciblés de manière spécifique dans le cadre de cette étude, tireront également profit de ce guide car certaines opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique sont génériques et peuvent leur être directement transposables.

Le présent guide constitue donc un complément utile aux guides sectoriels de gestion de l'énergie déjà existants dans l'industrie des produits laitiers[3] et l'industrie brassicole[4] auxquels le lecteur se référera notamment pour les mesures d'efficacité énergétique propres à des équipements ou opérations spécifiques au secteur concerné.

Méthodologie

Cet ouvrage identifie 22 technologies et groupes de mesures reconnues pour accroître l'efficacité énergétique à un coût économiquement acceptable et en présente 17 d'entre eux plus en détails. Il est destiné à être directement utilisable par les divers intervenants des secteurs visés (personnels, gestionnaires et dirigeants d'usines, firmes d'ingénierie, fabricants d'équipements, associations sectorielles, organismes gouvernementaux). Il porte principalement sur l'aspect pratique et l'illustration concrète de méthodes d'amélioration de l'efficacité énergétique à l'aide d'exemples de mises en application réplicables au Québec et au Canada. Le lecteur pourra toutefois se référer à la littérature spécialisée pour disposer de descriptions techniques détaillées.

Les différentes possibilités d'accroître l'efficacité énergétique ont été identifiées à partir d'une revue de la littérature et de bases de données spécialisées, associée à une consultation de manufacturiers et d'experts desservant le marché agroalimentaire. La revue ne s'est pas limitée aux seules réalisations et expertises canadiennes ce qui a permis d'identifier des mesures implantées ailleurs dans le monde et réplicables au Québec et au Canada. La plupart des données sur l'économie et l'utilisation de l'énergie dans l'industrie agroalimentaire proviennent de Statistique Canada, Industrie Canada, Environnement Canada et CIEEDAC (Canadian Industrial Energy End-Use Data and Analysis Center – Barnaby, Colombie Britanique, Canada) et constituaient les informations les plus récentes disponibles au moment de la préparation de ce document.

Résumé

Les 17 technologies et groupes de mesures d'efficacité énergétique décrites dans ce guide et regroupées dans le tableau "*Résumé des possibilités d'accroître l'efficacité énergétique dans l'industrie agroalimentaire*" en page 8 peuvent, lorsqu'elles s'appliquent, être avantageusement implantées et généralement présenter un retour sur l'investissement attrayant. Toutefois, la rentabilité et l'impact de tout projet dépendent du contexte énergétique et des caractéristiques propres à chaque usine et doivent faire l'objet d'une étude individualisée.

Les opportunités de réduire la consommation énergétique dans l'industrie agroalimentaire étant nombreuses, elles doivent être considérées de manière méthodique et structurée pour assurer les meilleurs résultats possibles en matière de réduction de la consommation d'énergie. En premier lieu, une politique d'efficacité énergétique devrait être élaborée et être clairement soutenue par la direction, connue de tous au sein de l'usine et inscrite dans la stratégie de développement de l'entreprise.

Lors de l'établissement d'une stratégie visant à réduire la consommation d'énergie de l'ensemble d'une usine, les projets visant à moderniser les installations ou à optimiser les paramètres d'opération des

---

[3] *Guide sur les possibilités d'accroître l'efficacité énergétique dans l'industrie de transformation de produits laitiers* Conseil national de l'industrie laitière du Canada, 1998.

[4] *Les possibilités d'amélioration du rendement énergétique dans l'industrie brassicole canadienne* – Association des Brasseurs du Canada, 1998.

procédés doivent généralement être menés en priorité. Par la suite, on aura tout intérêt à poursuivre sa recherche d'économies d'énergie selon une approche globale qui tient compte des interconnections entre les différentes opérations d'un procédé ou d'une usine ainsi que de l'interaction entre différentes mesures d'efficacité possibles. Le Centre de la technologie de l'énergie de CANMET - Varennes de Ressources naturelles Canada encourage l'utilisation d'une telle approche qui conduit à de meilleurs résultats de rentabilité et d'amélioration globale que diverses initiatives considérées isolément.

La première partie du guide présente les principales caractéristiques économiques (livraisons, nombre d'usines et employés, principales étapes de fabrication ou de transformation de différents produits, etc.) et énergétiques (évolution de la consommation d'énergie, part relative des différents combustibles, importance dans les coûts de production, consommation d'eau, etc.) de l'industrie agroalimentaire en général et plus particulièrement dans les secteurs des *viandes & volailles*, des *boissons* et de la *transformation du lait*.

Dans la deuxième partie, le guide traite des mesures traditionnelles d'amélioration de l'efficacité énergétique implantées dans le secteur industriel suite à un audit énergétique classique, en les illustrant d'exemples concrets et de nombreux résultats typiques qu'il est possible d'obtenir.

Le guide présente et décrit ensuite un ensemble de nouvelles techniques et de nouveaux procédés de séparation, de traitement thermique, de contrôle bactérien et de récupération d'énergie éprouvés et reconnus pour utiliser plus efficacement l'énergie. Plusieurs réalisations industrielles dans les secteurs visés démontrent l'intérêt technico-économique et environnemental de ces technologies.

Par la suite, des méthodes plus globales d'optimisation énergétique, illustrées d'études de cas réels dans les industries des viandes, des boissons et de la transformation du lait sont présentées plus en détail :

- Le "Monitoring & Targeting" qui favorise les améliorations continues grâce à des contrôles réguliers ainsi qu'à l'établissement d'objectifs de consommation énergétique ;
- L'Intégration des Procédés (IP) qui, par une analyse systématique et globale d'une usine ou d'un procédé, permet (en complément aux audits énergétiques traditionnels) d'identifier des projets d'amélioration globale même si certaines mesures d'efficacité énergétiques ont déjà été implantées.

Enfin, la dernière partie de l'ouvrage fournit un ensemble de données et de facteurs de conversion d'unités reliés à l'énergie ainsi qu'une liste de références bibliographiques à laquelle le lecteur pourra se reporter pour des questions générales ou plus spécifiques à un sous-secteur industriel particulier auquel ce guide est destiné.

Résumé des possibilités d'accroître l'efficacité énergétique dans l'industrie agroalimentaire

Ensemble de mesures ou technologie	Secteur [1]	Type de technologie [2]	Potentiel d'économie d'énergie [3]	Période de retour sur investissement [4]
Motivation du personnel à l'économie d'énergie	V, B, L	I	Modéré à Élevé	Courte
Gestion de la consommation électrique	V, B, L	I	Modéré	Courte à Moyenne
Air comprimé	V, B, L	I	Faible	Courte à Moyenne
Chauffage, ventilation et climatisation (CVC)	V, B, L	I	Faible	Courte à Moyenne
Réfrigération et refroidissement	V, B, L	I	Modéré	Courte à Moyenne
Production et distribution de vapeur	V, B, L	I	Élevé	Courte à Moyenne
Gestion de l'eau	V, B, L	I	Faible à Modéré	Moyenne à Longue
Membranes	B, L	II	Modéré à Élevé	Moyenne à Longue
Pompe à chaleur (PAC)	V	II	Modéré à Élevé	Longue
Recompression mécanique de la vapeur (RMV)	B, L	II	Élevé	Moyenne à Longue
Nouveaux modes de transfert thermique : - Infrarouge (IR) - Micro-ondes (MO) et hautes fréquences (HF) - Chauffage ohmique - Chauffage par induction	 V V V L	 II II II II	 Modéré Modéré Modére Modéré	 Moyenne Longue Longue Moyenne à Longue
Valves d'homogénéisation à haute efficacité	L	II	Faible	Moyenne
Monitoring & Targeting	V, B, L	III	Modéré à Élevé	Courte à Moyenne
Intégration des procédés [5]	V, B, L	III	Élevé	Courte à Moyenne

Notes :

1. Secteurs pour lesquels les technologies ou mesures d'efficacité énergétique sont illustrées d'exemples de mises en application dans ce guide : V : Industrie de la transformation des viandes et des volailles ; B : Industrie des boissons gazeuses et de la bière ; L : Industrie de la transformation du lait.
2. "I" Mesures traditionnelles d'améliorations de l'efficacité énergétique (partie D du guide) ; "II" Technologies applicables dans les procédés de fabrication (partie E du guide) ; "III" Méthodes avancées d'optimisation énergétique (partie F du guide).
3. Le potentiel d'économie d'énergie varie généralement d'un secteur à l'autre et en fonction de la taille de l'entreprise. Il se rapporte à l'ensemble de la consommation d'énergie de l'entreprise. À titre d'exemple, même s'il est possible de réduire considérablement la consommation énergétique liée à la production d'air comprimé, l'impact sur le bilan énergétique global de l'entreprise reste généralement faible.
4. Retour sur investissement simple évalué sur la seule base des économies d'énergie (d'autres avantages tels qu'une qualité de produit plus grande, une consommation moindre de matières premières peuvent parfois augmenter l'intérêt d'une technologie).
5. Technologie adaptée aux procédés ou sites industriels complexes ayant des coûts d'énergie supérieurs à 1 000 000 $/an dont la majorité en énergie thermique (gaz naturel, huile, vapeur, etc.).

B. PROFILS ÉCONOMIQUES ET ÉNERGÉTIQUES SECTORIELS

B.1. L'industrie canadienne des aliments et boissons
B.1.1. L'utilisation de l'eau dans l'industrie des aliments et boissons

B.2. L'industrie canadienne des viandes et volailles
B.2.1. L'industrie des viandes rouges
B.2.2. L'industrie des volailles
B.2.3. L'utilisation de l'eau dans l'industrie des viandes et volailles

B.3. L'industrie canadienne des boissons
B.3.1. L'industrie brassicole
B.3.2. L'industrie des boissons douces
B.3.3. L'utilisation de l'eau dans l'industrie des boissons

B.4. L'industrie canadienne de la transformation du lait
B.4.1. L'utilisation de l'eau dans l'industrie de la transformation du lait

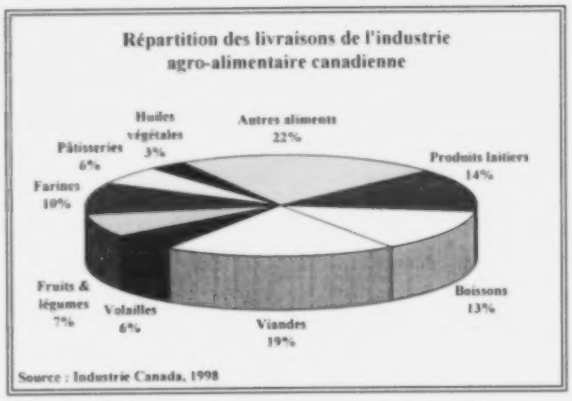
Par le montant de ses livraisons et l'emploi qu'elle génère, l'industrie agroalimentaire joue un rôle très important dans l'économie du Canada et du Québec. Alors qu'elle fait face à une concurrence de plus en plus importante, toute action visant à réduire ses coûts de production, dont l'énergie, a un effet bénéfique direct sur ses marges bénéficiaires.

Cette partie décrit la place qu'occupe l'industrie agroalimentaire en général et les industries des viandes, des boissons et de la transformation du lait en particulier dans l'économie du Canada et du Québec. Elle présente également, sous forme de graphiques, un ensemble de données relatives à leur consommation d'énergie (tendance au cours des dernières années, part de l'électricité et des différents combustibles fossiles, consommations spécifiques, etc.) ainsi qu'à leur besoin en eau.

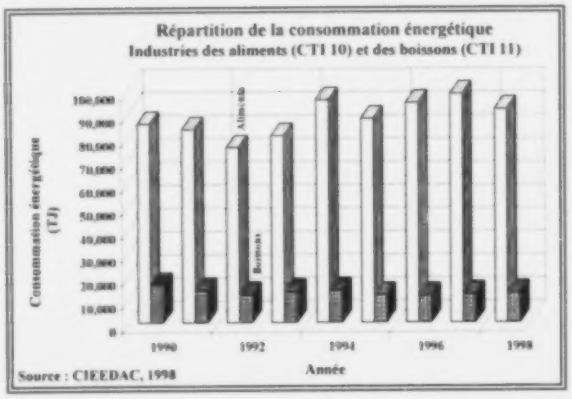
B. Profils Économiques et Énergétiques Sectoriels

B.1. L'industrie canadienne des aliments et boissons

Avec un chiffre d'affaires de 59,4 milliards de dollars en 1998, en hausse de 1,9% par rapport à 1997 et représentant 13,5% de la valeur totale des livraisons du secteur manufacturier canadien, le secteur des aliments (CTI 10) et des boissons (CTI 11) est le deuxième plus important de l'industrie manufacturière au Canada n'étant devancé que par la fabrication de matériel de transport. Il occupe le premier rang dans l'ensemble des provinces canadiennes à l'exception de l'Ontario, de la Colombie Britannique et du Nouveau Brunswick où il se situe au deuxième rang.

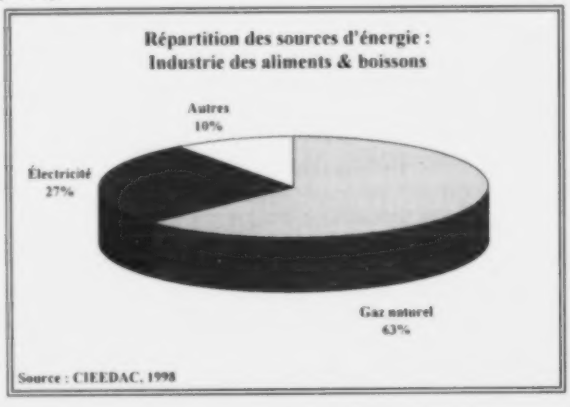


Toujours en 1998, les entreprises du secteur employaient directement 167 600 personnes dans ses 3 880 établissements. Même si le secteur est d'envergure nationale, l'industrie des aliments et boissons est plus fortement concentrée en Ontario (42% des livraisons, 34% des établissements, 37% des employés), au Québec (24% des livraisons, 22% des établissements, 25% des employés), en Alberta (11% des livraisons, 10% des établissements, 9% des employés) et en Colombie Britannique (7% des livraisons, 13% des établissements, 9% des employés).



Le secteur est dominé par la transformation des viandes et des volailles (25%), la transformation des produits laitiers (14%) et l'industrie des boissons (13%).

La consommation énergétique de l'industrie des aliments (CTI 10) et des boissons (CTI 11) s'élevait en 1998 à 104 600 TJ (29 050 GWh), soit environ 4% de toute l'énergie consommée par le secteur manufacturier canadien, pour une facture énergétique correspondante de 818 millions de dollars. Par rapport à 1990, cette consommation correspond à une hausse moyenne de 3%, mais diverses variations tantôt à la hausse et tantôt à la baisse ont été enregistrées sur la même période. Au Québec,



les besoins énergétiques de l'industrie agroalimentaire se montent à 6 950 GWh pour une facture de 180 millions de dollars.

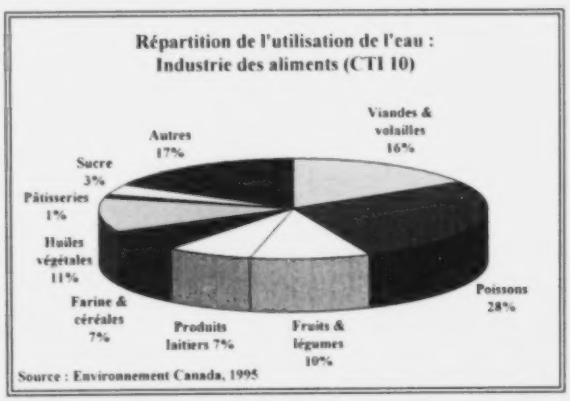
Le secteur des aliments représente à lui seul 88% des besoins énergétiques de l'industrie agroalimentaire alors que le secteur des boissons en consomme 12%. Avec 86 et 14% respectivement, cette répartition est sensiblement identique au Québec.

Toujours en 1998, la part de l'énergie dans les coûts de production était de 1,9% pour l'industrie des aliments et de 2,6% pour l'industrie des boissons.

Le gaz naturel est la principale source d'énergie utilisée dans l'industrie des aliments & boissons. En effet, il représente 63% du bilan énergétique du secteur, loin devant l'électricité qui couvre 27% des besoins énergétiques.

Cette tendance dans l'utilisation des sources d'énergie est la même dans les secteurs des aliments et des boissons qui ont recours au gaz naturel à hauteur de 62 et 70% respectivement.

B.1.1. L'utilisation de l'eau dans l'industrie des aliments et boissons



Dans son rapport de 1995, Environnement Canada estimait à 420 millions de m^3 la consommation d'eau de l'industrie agroalimentaire canadienne dont 347 millions de m^3 par l'industrie des aliments (CTI 10) et 73 millions de m^3 par l'industrie des boissons (CTI 11). Cela représentait 86 millions de dollars en coûts d'acquisition et de gestion des effluents dont 82% (70 millions de dollars) pour le secteur des aliments et 18% (16 millions de dollars) pour le secteur des boissons. Notons que depuis 1995, les coûts associés au traitement des effluents ont considérablement augmenté dans de nombreuses municipalités avec l'apparition de taxes sur les effluents rejetés aux égouts municipaux.

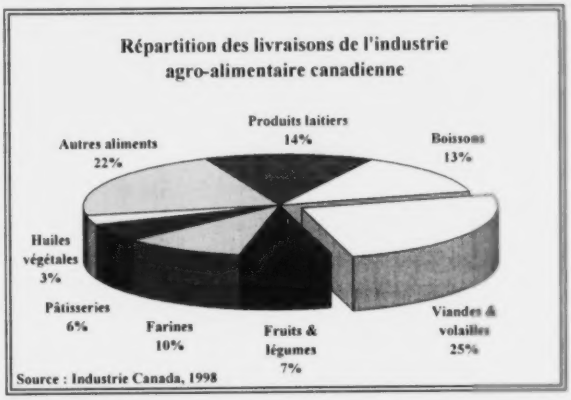
Sur le plan énergétique, une telle quantité d'eau nécessite 1,8 PJ (7,2 millions de dollars en gaz naturel à 4 $/GJ) pour toute variation de 1 °C de sa température. Ceci illustre la forte consommation d'énergie associée à la consommation d'eau lorsque celle-ci doit être chauffée.

Au sein de l'industrie des aliments, les cinq principaux utilisateurs représentent plus de 70% de l'ensemble des besoins en eau. Parmi ceux-ci, on retrouve les secteurs de la transformation des poissons & crustacés[5] (28% du total), des viandes & volailles (16%), des huiles végétales (11%), des fruits & légumes (10%) et du lait (7%).

[5] La transformation des poissons & crustacés occupe une place particulière dans l'industrie agroalimentaire. En effet, la plupart des installations sont localisées à proximité des côtes et prélèvent la majorité de leur eau (essentiellement de l'eau de lavage) directement dans la mer.

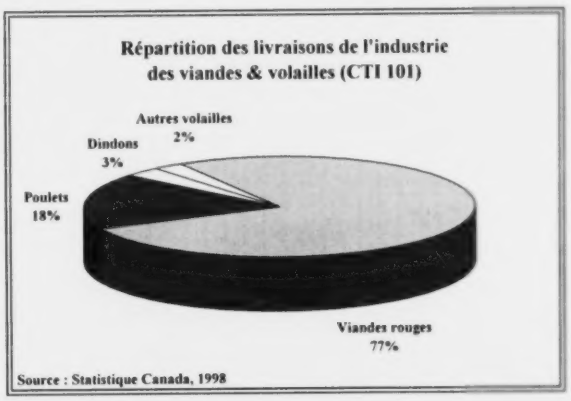
B.2. L'industrie canadienne des viandes et volailles

Avec un chiffre d'affaires de 14,5 milliards de dollars en 1998, l'industrie des viandes & volailles (CTI 101) représentait 25% des livraisons du secteur des aliments et boissons et occupait le premier rang de l'industrie agroalimentaire canadienne devant les secteurs des produits laitiers et des boissons. La progression de ses livraisons (+ 30% entre 1990 et 1998) témoigne du dynamisme du secteur aussi bien sur le marché intérieur qu'à l'exportation.



Au Canada, l'industrie des viandes & volailles est constituée de deux principales sous-familles :

❶ Le secteur des *viandes rouges & produits carnés à l'exclusion de la volaille* (CTI 1011) faisant majoritairement référence aux produits et sous-produits des viandes de bœuf et de porc qui représentent 94% de ses recettes. Les 6% restants sont le fait des autres viandes telles l'agneau, le veau, le cheval ou le gibier, des peaux, des abats, des matières grasses et des autres sous-produits commercialisables.



❷ Le secteur des *volailles* (CTI 1012) regroupant l'ensemble des produits avicoles avec notamment le poulet et le dindon mais aussi d'autres espèces telles que le canard, l'oie, la pintade, la caille et le gibier à plumes.

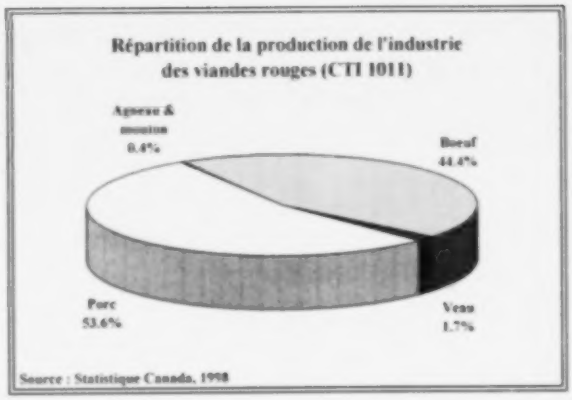
En 1998, les Canadiens ont consommé en moyenne 32 kg de volaille et 22 kg de bœuf alors qu'il y a vingt ans la consommation de bœuf était deux fois plus élevée que la consommation de volaille.

A lui seul, avec des livraisons se montant à 11,3 milliards de dollars en 1998 (en progression annuelle moyenne de près de 3% depuis 1990), le secteur de l'industrie des viandes rouges représentait 77% de l'activité de l'industrie des viandes et volailles et 19% des expéditions du secteur des aliments et boissons.

Toujours en 1998, l'industrie des volailles représentait 23% du chiffre d'affaires de l'activité liée à la transformation des viandes et volailles. En hausse de 55% par rapport à 1990, ses livraisons (3,4 milliards de dollars) représentaient 5,6% de l'industrie agroalimentaire canadienne.

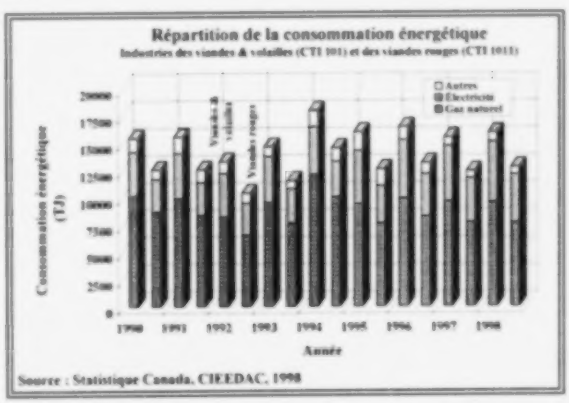
B.2.1. L'industrie des viandes rouges

La transformation des viandes rouges constitue le premier employeur en importance au sein de l'industrie agroalimentaire, avec plus de 38 000 employés dans 470 établissements. La majorité des entreprises (70% environ) ont moins de 50 employés et sont souvent spécialisées dans la fabrication de produits spécifiques. À l'opposé, moins de 10% des établissements comptent plus de 200 employés.



Avec respectivement 54% et 44% de la production totale de viandes rouges, le bœuf et le porc dominent largement le secteur. Bien que l'on observe une baisse régulière de la consommation de viande rouge au Canada depuis plus de 15 ans, ce changement dans le comportement alimentaire des canadiens est compensé par une augmentation spectaculaire des exportations qui sont passées de 1,9 à 4,5 milliards de dollars entre 1990 et 1999 et ont augmenté de 84% au cours des cinq dernières années.

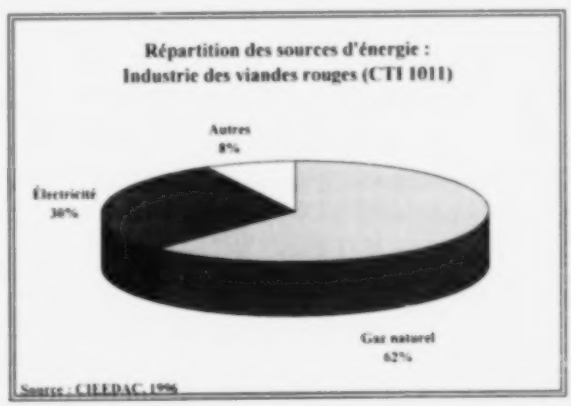
Même si l'industrie est d'envergure nationale, la transformation des viandes rouges est fortement concentrée dans certaines régions. En 1996, 61% des porcs abattus au Canada (sur un total de 14,9 millions de têtes) ont ainsi été transformés en Ontario et au Québec, la part des provinces de l'Ouest s'élevant à 36%. Parallèlement, l'Alberta a dominé l'industrie du bœuf avec 62% des abattages canadiens de bovins (sur un total de 2,9 millions têtes) suivie de l'Ontario avec 20%.



La consommation énergétique du secteur des viandes rouges était en 1998 de 12 760 TJ (3 540 GWh), ce qui représente environ 80% de toute l'énergie consommée par l'ensemble de l'industrie des viandes.

Entre 1996 et 1998, les besoins en énergie ont progressé de 5% alors que la production connaissait une forte augmentation de près de 12% sur la même période.

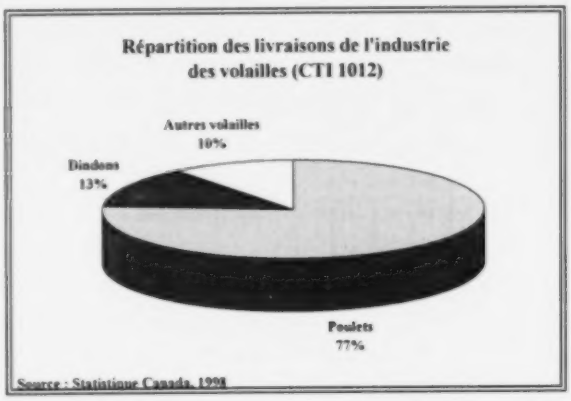
La part de l'énergie dans les coûts de production du secteur est relativement constante depuis de nombreuses années et se situent aux alentours de 1,4%.



Du point de vue énergétique, le gaz naturel est la principale source d'énergie dans l'industrie des viandes et couvre 62% des besoins en énergie du secteur. L'électricité est la deuxième source d'énergie en importance en fournissant 30% de l'énergie consommée. Les autres sources d'énergie (différents types d'huiles, gaz de pétrole liquéfié) sont assez peu utilisées et ne couvrent que 8% des besoins.

B.2.2. L'industrie des volailles

Les établissements de transformation de la volaille sont répartis sur l'ensemble du territoire canadien avec toutefois une implantation plus marquée dans le centre du pays. Les provinces de l'Ontario et du Québec représentent les deux tiers de la production nationale (41% et 24% respectivement) et regroupent 61% des établissements (34% et 27% respectivement).

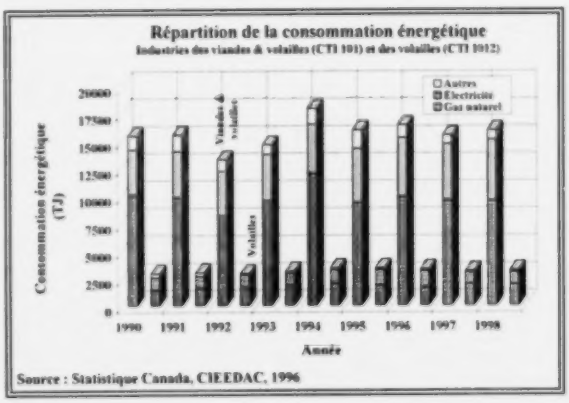


Les livraisons de volailles sont largement dominées par celles de poulets qui représentaient à elles seules 77% du chiffre d'affaires du secteur en 1998.

On estime que 60% de la viande de poulet est vendue sous forme de morceaux, 10% sous forme de carcasses ou d'oiseaux entiers et 30% sous forme de produits élaborés (plats cuisinés, etc.). De son côté, le dindon est principalement mis en marché sous forme de carcasses entières (66% surgelées et 18% fraîches), le reste se répartissant à parts égales entre morceaux et produits transformés.

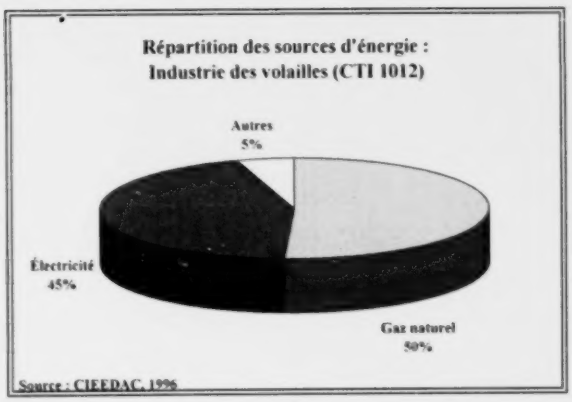
Le secteur avicole se caractérise par une grande concentration puisque les 4 plus grands transformateurs de volailles du pays assurent plus de 50% de la production. Les coopératives de producteurs y occupent une position très importante et 2 d'entre elles figurent parmi les 4 principaux transformateurs du pays.

En 1998, la consommation énergétique de l'industrie des volailles s'élevait à 3200 TJ (890 GWh), soit environ 20% de l'énergie consommée par le secteur des viandes et 3,5% des besoins énergétiques de l'industrie des aliments et boissons. Entre 1996 et 1998, les besoins en énergie du secteur des volailles ont enregistré une progression d'environ 14% alors que la production a progressé de 29%.



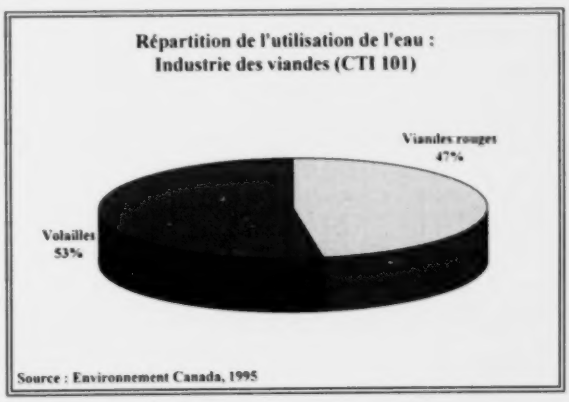
La part de l'énergie dans les coûts de fabrication est relativement constante depuis plusieurs années, variant entre 1,3 et 1,5% en fonction du coût de l'énergie.

Comme pour le secteur des viandes rouges, le gaz naturel demeure la principale source d'énergie utilisée. Toutefois, en couvrant 50% des besoins énergétiques du secteur, il devance de peu l'électricité qui couvre 45% des besoins énergétiques. De part l'importance de la mécanisation des procédés et des besoins en réfrigération, l'industrie des volailles apparaît comme un secteur où l'électricité occupe une place particulièrement importante.



B.2.3. L'utilisation de l'eau dans l'industrie des viandes et volailles

Le secteur de la transformation de la viande est un grand consommateur d'eau. Il demande un rinçage abondant des carcasses et nécessite de fréquentes opérations de nettoyage afin de satisfaire aux critères d'hygiène. En Angleterre par exemple, des consommations spécifiques, exprimées en litres d'eau par animal abattu, telles que 700 à 1 000 (boeuf), 160 à 230 (porc), 40 à 60 (dindon) et 8 à 15 (poulet) sont considérées comme correspondant à de bonnes pratiques.



On estime que dans la plupart des abattoirs, la moitié de l'eau utilisée est chauffée entre 40 et 60 °C et constitue donc un poste important de consommation énergétique.

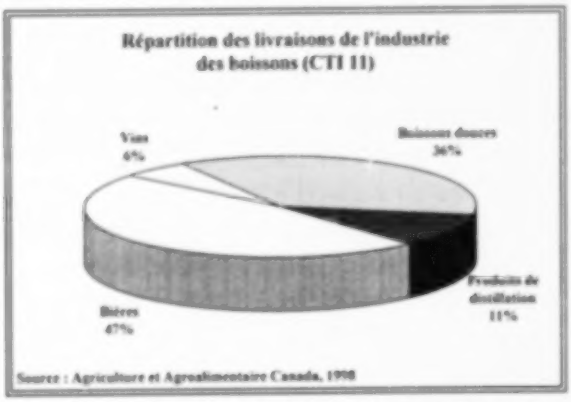
Au sein de l'industrie des viandes, les besoins en eau se répartissent pratiquement à part égale entre les secteurs des *viandes rouges* et des *volailles* qui en font une utilisation assez comparable.

B.3. L'industrie canadienne des boissons

En 1998, l'industrie des boissons (CTI 11) a généré un chiffre d'affaire de 7,4 milliards de dollars, en progression de 3,7% par rapport à 1990. Le secteur des boissons occupe ainsi le troisième rang de l'industrie agroalimentaire canadienne par l'importance de ses livraisons après les secteurs des viandes rouges et des produits laitiers.

Au Canada, l'industrie des boissons est largement dominée par les secteurs de la bière (CTI 1131) et des boissons douces (CTI 1111) qui, ensemble, représentent quelques 83% de ses livraisons.

Avec des ventes représentant 3,5 milliards de dollars en 1998, l'industrie brassicole (CTI 1131) représentait à elle seule près de 47% de l'ensemble de l'industrie canadienne des boissons et 6,1% du secteur des aliments et boissons.



Toujours en 1998, l'industrie des boissons douces (CTI 1111) représentait, quant à elle, 36% du total des expéditions du secteur des boissons et, à près de 2,7 milliards de dollars, son chiffre d'affaires était en hausse de près de 70% par rapport à 1990 et représentait environ 4,8% du total des ventes de l'industrie agroalimentaire canadienne.

B.3.1. L'industrie brassicole

Les brasseries emploient directement 16 800 personnes dans 76 établissements. Au total ce sont plus de 163 000 travailleurs dont l'emploi est lié à l'industrie de la bière.

Le secteur est dominé par deux brasseurs nationaux et est constitué de 24 brasseries conventionnelles et 52 microbrasseries. Selon l'Association des Brasseurs du Canada (ABC) :

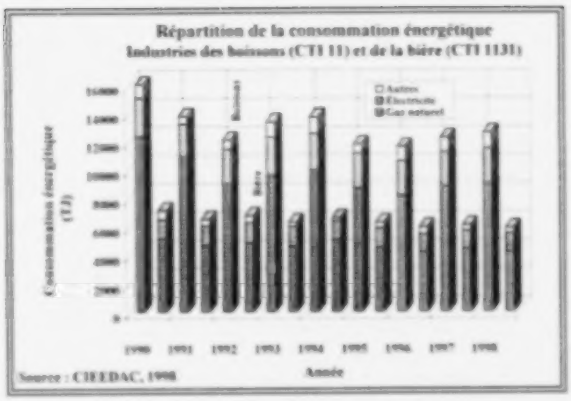
❶ Une *brasserie conventionnelle* est une brasserie qui commercialise ses produits principalement par le biais d'un ou de plusieurs systèmes de distribution provinciaux et qui produit annuellement *plus de 60 000 hectolitres* de bière.

❷ Une *microbrasserie* est une brasserie qui produit annuellement *moins de 60 000 hectolitres* de bière et qui commercialise ses produits principalement à partir de ses installations.

Les activités brassicoles sont surtout situées en Ontario, en Colombie Britannique et au Québec où l'on retrouve 79% des usines du pays.

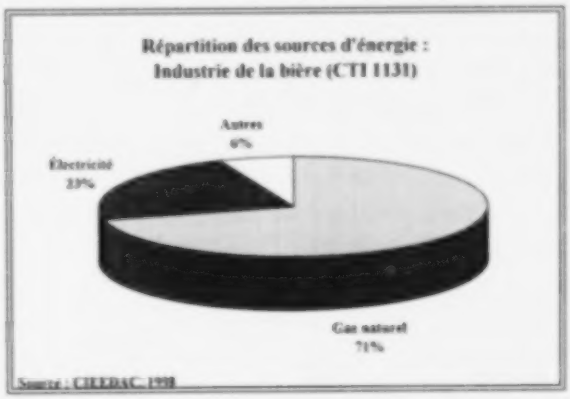
Les brasseries canadiennes ont produit 24,3 millions d'hectolitres de bière en 1998, en augmentation de 2% par rapport à 1990. La plus grande partie de la bière vendue au Canada est produite au pays : en 1999, seulement 7% de toute la bière vendue au Canada était importée.

En 1998, la consommation énergétique de l'industrie brassicole s'élevait à 5 900 TJ (1 640 GWh), soit environ 47% de toute l'énergie consommée par l'industrie des boissons et 6% des besoins énergétiques de l'ensemble du secteur agroalimentaire. Par rapport à 1990, cette consommation a enregistré une baisse de près de 18% alors que la production du secteur est demeurée pratiquement constante.



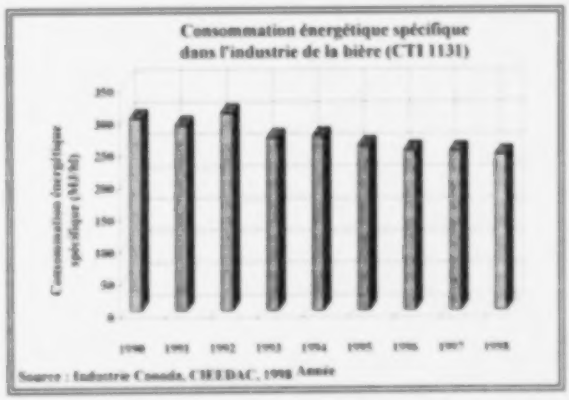
La part de l'énergie dans les coûts de production du secteur est relativement constante depuis de nombreuses années, variant entre 5 et 6% en fonction du coût de l'énergie.

Le gaz naturel est la principale source d'énergie utilisée dans l'industrie brassicole. En effet, il représente 71% du bilan énergétique du secteur, l'électricité arrivant en deuxième position avec 23% des besoins énergétiques. Les autres sources d'énergie (charbon, différents types d'huiles, gaz de pétrole liquéfiés) sont de bien moindre importance et assurent 6% de la consommation énergétique.



Cette tendance dans l'utilisation des sources d'énergie est la même pour l'ensemble de l'industrie des aliments et boissons.

Depuis 1990, la consommation spécifique du secteur, c'est à dire l'énergie nécessaire à la fabrication d'un hectolitre de bière, a régulièrement baissé de plus de 15%. En 1998, elle s'établissait en moyenne à 240 MJ/hl, mais selon l'Association des Brasseurs Canadiens, certaines brasseries commencent à franchir le seuil des 200 voire 180-190 MJ/hl (notamment en Colombie Britannique où le climat est plus doux que dans le reste du Canada) ce qui, dans le milieu brassicole canadien, est considéré comme étant très faible.



B.3.2. L'industrie des boissons douces

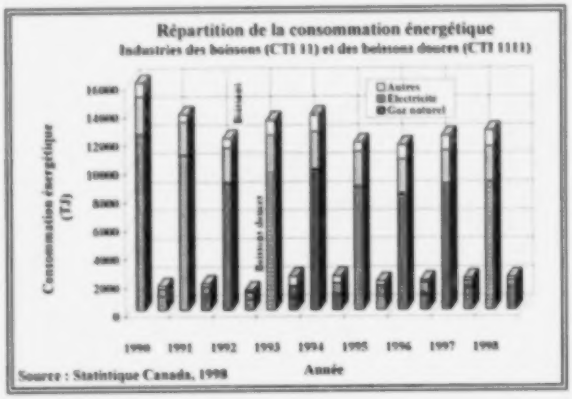
Les entreprises du secteur des boissons douces emploient directement 6 600 personnes dans quelques 167 usines, ce qui représente 3,3% des emplois de l'industrie agroalimentaire et 6% des usines de transformation des aliments et boissons.

L'industrie des boissons douces se caractérise par une très forte concentration. Trois des quatre principaux fabricants, dont les ventes sont supérieures à 100 millions de dollars, sont des filiales de multinationales étrangères et réalisent la grande majorité des expéditions du secteur. D'un autre côté, un grand nombre de petits fabricants se sont spécialisés et positionnés sur quelques marchés à niches.

Les sites de production sont surtout situés au Québec où l'on retrouve 29% des usines, en Ontario (26%), en Colombie Britannique (12%) et en Alberta (12%).

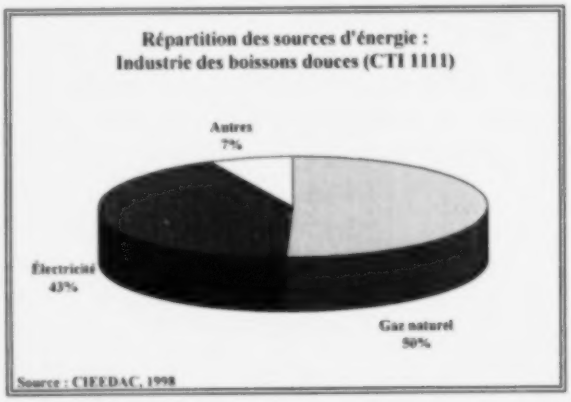
En 1998, la production des installations canadiennes s'est élevée à 35,7 millions d'hectolitres, en hausse de 51% par rapport à 1991 alors que la consommation par habitant augmentait de 23% sur la même période pour s'établir à 116 litres.

La consommation énergétique du secteur des boissons douces était en 1998 de 2268 TJ (630 GWh), ce qui représente environ 18% de toute l'énergie consommée par l'industrie des boissons. Par rapport à 1990, cette consommation a enregistré une progression d'environ 23% alors que la production connaissait, elle aussi, une forte augmentation de près de 51% sur la même période.



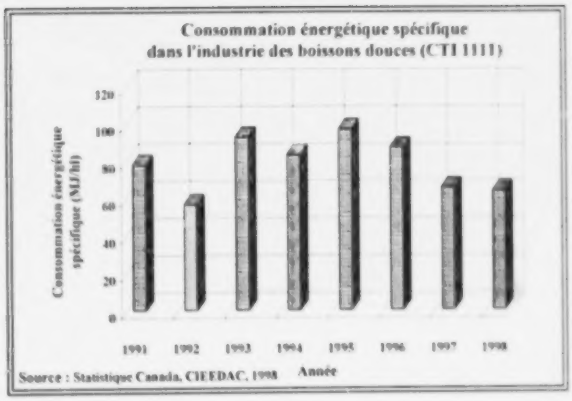
La part de l'énergie dans les coûts de production du secteur est relativement constante depuis de nombreuses années, variant entre 2 et 3%.

Comme dans le reste du secteur des boissons, le gaz naturel demeure la principale source d'énergie utilisée. Toutefois, en couvrant 50% des besoins énergétiques du secteur, il devance de peu l'électricité qui représente 43% de la consommation énergétique Les autres sources d'énergie (charbon, différents types d'huile, gaz de pétrole liquéfiés) sont de bien moindre importance et n'assurent plus que 7% des besoins.



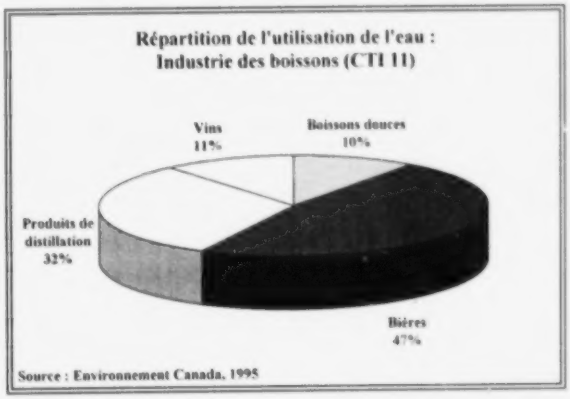
L'industrie des boissons douces apparaît donc comme un secteur où l'électricité occupe une place plus importante qu'ailleurs au sein du secteur des boissons, les besoins de chauffage et l'utilisation de vapeur étant moindres.

La consommation spécifique du secteur (c'est à dire l'énergie nécessaire à la fabrication d'un hectolitre de boisson douce) après des variations tantôt à la hausse, tantôt à la baisse entre 1991 et 1995, a régulièrement baissé de plus de 30% depuis 1995. En 1998, elle s'établissait en moyenne à 64 MJ/hl. Cette dernière valeur n'est toutefois qu'une moyenne sur l'ensemble des productions et ne reflète pas les disparités qui existent entre les différents types de production ayant des besoins énergétiques très différents (boissons gazeuses, jus de fruit, eaux minérales, etc.).



B.3.3. L'utilisation de l'eau dans l'industrie des boissons

Le **secteur brassicole** représente à lui seul pratiquement 50% des prélèvements d'eau de l'industrie des boissons À l'heure actuelle, le ratio de la consommation d'eau par hectolitre de bière produite au Canada s'élève en moyenne à 8:1. D'après l'Association des Brasseurs du Canada (ABC), ce ratio varie beaucoup d'une brasserie à l'autre. Certaines brasseries ont un ratio aussi élevé que 20:1 alors que d'autres ont un ratio aussi bas que 4,5:1. Notons que les brasseries les plus avancées dans le domaine (au Japon ou aux États-Unis) présentent des ratios inférieurs à 3:1.

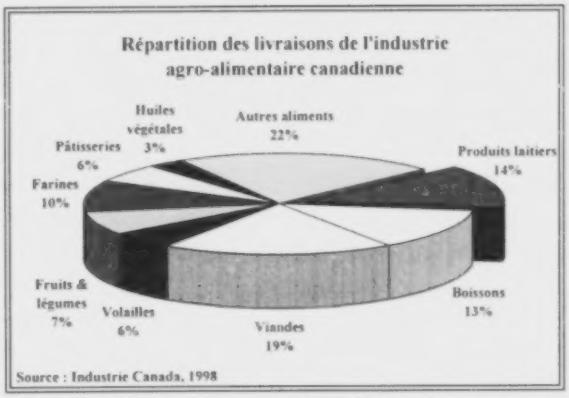


Ainsi, si l'on considère qu'à certains endroits du procédé l'eau doit être chauffée à plus de 60 °C alors qu'à d'autres endroits l'eau doit être refroidie à des températures de quelques degrés, un potentiel important de réduction de la consommation d'eau et d'énergie existe au sein de l'industrie de la bière. On estime ainsi à 150 MJ l'énergie associée à tout m^3 d'eau économisé.

Les **produits de distillation**, quant à eux, représentent environ 30% des besoins en eau de l'industrie des boissons. Viennent ensuite les secteurs des **vins** et des **boissons douces** (10% des prélèvements d'eau chacun).

B.4. L'industrie canadienne de la transformation du lait

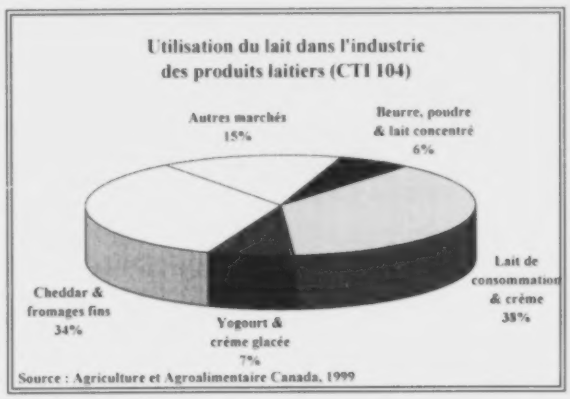
L'industrie laitière (CTI 104) occupe le deuxième rang de l'industrie agroalimentaire canadienne par l'importance de ses livraisons après le secteur des viandes rouges. En 1999, ses usines ont transformé 79,5 millions d'hectolitres de lait cru et leurs livraisons se sont montées à plus de 8,5 milliards de dollars, soit environ 14% de l'ensemble les ventes du secteur des aliments et boissons au Canada.



Environ 26 000 personnes travaillent dans quelques 22 600 exploitations laitières et 20 500 autres sont employées dans les 270 usines de transformation du lait. Ces chiffres confèrent au secteur laitier le titre de deuxième employeur de l'industrie alimentaire canadienne, derrière le secteur des viandes rouges.

L'industrie du lait est structurée autour de ses deux principaux marchés :

❶ Le sous-secteur du *lait de consommation* (CTI 1041) regroupe environ 110 usines et traite 39% (31 millions d'hectolitres) du lait produit dans les fermes canadiennes. Son activité principale est la transformation du lait en produits de consommation directe (lait liquide, crème fraîche, lait au chocolat et autres laits aromatisés, babeurre, etc.).



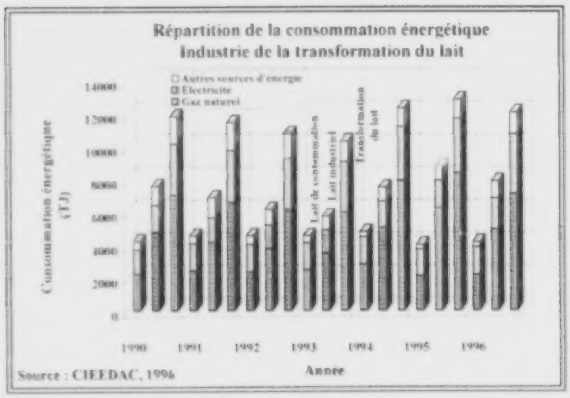
❷ Le sous-secteur du *lait industriel* (CTI 1049) transforme dans ses 160 usines les 61% restant (48,5 millions d'hectolitres) en produits à valeur ajoutée tels que le fromage (35%), le beurre, le lait concentré et le lait en poudre (6%), les yogourts et les crèmes glacées (7%).

Les activités de transformation du lait sont surtout situées en Ontario et au Québec où l'on retrouve 66% des usines (respectivement 105 et 74 en 1997) représentant 70% de la production nationale.

Sur le plan structurel, les coopératives appartenant à des agriculteurs-sociétaires assurent environ 60% de la production du secteur. Le reste se répartit entre des entreprises de tailles très diverses.

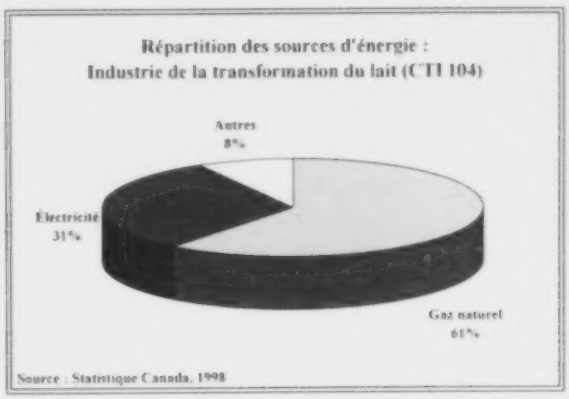
La concentration des entreprises dans ce secteur progresse et les multinationales jouent un rôle de plus en plus important. Ainsi, 3 entreprises enregistrent actuellement un chiffre d'affaire annuel de plus d'un milliard de dollars chacune. Les 5 plus grandes contrôlent 60% de la transformation laitière au Canada et les 8 plus grandes en contrôlent entre 85 et 90%.

En 1998, la consommation énergétique de l'industrie laitière s'élevait à 12 700 TJ (3 530 GWh), soit environ 13% de toute l'énergie consommée par l'ensemble de l'industrie canadienne des aliments et boissons. Par rapport à 1990, cela représente une augmentation d'environ 6% des besoins énergétiques alors que la production du secteur a progressé de 1,5%. Au sein du secteur laitier, l'énergie consommée se répartit entre le lait de consommation (CTI 1041) et le lait industriel (CTI 1049) respectivement à hauteur de 35% et 65%, ces activités représentant alors respectivement environ 4% et 8% de la consommation totale du secteur de la transformation des aliments.



Bien que la consommation d'énergie ait augmenté de 6% entre 1990 et 1998, la part de l'énergie dans les coûts de fabrication a diminué graduellement de 15% sur la même période. Elle représente actuellement environ 1,5% des coûts de production.

Le gaz naturel est la principale source d'énergie dans l'industrie du lait et assure 61% du bilan énergétique de l'ensemble du secteur. Il représente 52% des besoins liés à la transformation du lait de consommation et 63% de ceux du lait industriel. L'électricité est la deuxième source d'énergie en importance et fournit 31% de l'énergie consommée par le secteur (41% pour le lait de consommation et 24% pour le lait industriel). Les autres sources d'énergie (charbon, différents types d'huile, gaz de pétrole liquifiés) sont de bien moindre importance et couvrent 8% des besoins.



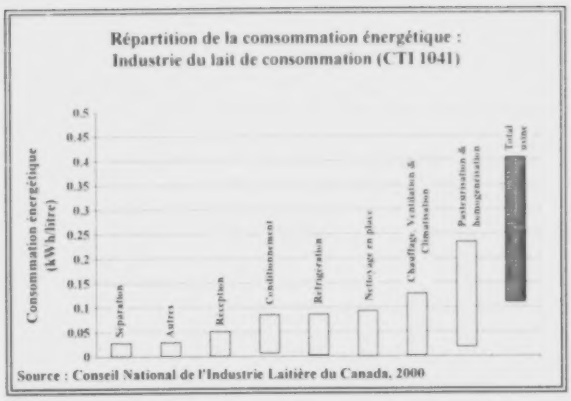
Entre 1990 à 1994, l'intensité de l'utilisation de l'énergie (exprimée en kWh électrique ou MJ thermique par litre de lait traité) est demeurée relativement constante au sein du secteur laitier, aussi bien au niveau du lait de consommation que du lait industriel.

Secteur d'activité	Intensité de l'énergie électrique	Intensité de l'énergie thermique
Lait de consommation (CTI 1041)	0,2 kWh/l	1,1 MJ/l
Lait industriel (CTI 1049)	0,1 kWh/l	1,1 à 1,4 MJ/l*

* : variable en fonction du type de produit

Source : Conseil National de l'Industrie Laitière du Canada, 1998

Une enquête réalisée en 1998 auprès de 17 usines canadiennes produisant du lait de consommation[6] révélait que le poste homogénéisation & pasteurisation est de loin le plus énergivore (0,02 à 0,2 kWh/l), suivi des systèmes CVC (chauffage, ventilation & climatisation), du NEP (nettoyage en place), de la réfrigération et du conditionnement (remplissage & emballage), ces derniers présentant une consommation énergétique assez voisine (jusqu'à 0,09 kWh/l).

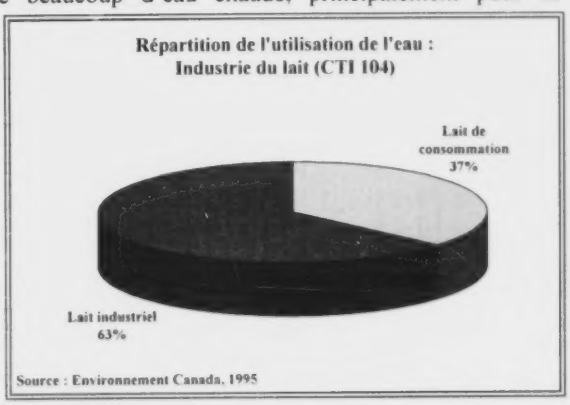


Note : *bien que les usines ciblées par l'enquête soient parmi les plus grandes au Canada, on observe d'importantes variations dans les consommations énergétiques unitaires d'un site à l'autre, traduisant ainsi une grande disparité au sein de l'industrie de la transformation du lait.*

B.4.1. L'utilisation de l'eau dans l'industrie de la transformation du lait

L'industrie de la transformation du lait utilise beaucoup d'eau chaude, principalement pour la pasteurisation du lait et le nettoyage des équipements. On estime ainsi que l'énergie nécessaire au chauffage de l'eau représente plus de 60% des besoins énergétiques du secteur.

Au sein du secteur laitier, les besoins en eau se répartissent entre le *lait de consommation* et le *lait industriel* à hauteur de 37% et 63%. Cette répartition suit la même tendance que la consommation énergétique (35% et 65% respectivement) et la transformation laitière (39% et 61% de l'ensemble du volume de lait traité).



[6] La capacité de production totale des 17 usines représentait 56% de tout le lait transformé au Canada. Cinq d'entre elles traitaient entre 20 et 40 millions de litres par an, 5 traitaient entre 40 et 80 millions de litres par an et 7 traitaient plus de 80 millions de litres par an. Parmi les 17 usines, 4 étaient au Québec, 5 en Ontario, 4 dans l'Ouest canadien et 4 dans les provinces Atlantiques. Pour les usines "complexes", c'est à dire produisant divers autres produits laitiers en plus du lait de consommation, seules les données relatives au lait de consommation ont été prises en compte dans le cadre de l'enquête.

C. PRINCIPALES ÉTAPES DE FABRICATION

C.1. L'industrie des viandes et volailles

- C.1.1. Abattage et transformation de porcs
- C.1.2. Abattage et transformation de bovins
- C.1.3. Abattage et transformation de poulets

C.2. L'industrie des boissons

- C.2.1. Bière
- C.2.2. Boissons douces

C.3. L'industrie de la transformation du lait

- C.3.1. Lait de consommation
- C.3.2. Produits laitiers de culture
- C.3.3. Beurre et crème glacée
- C.3.4. Fromage
- C.3.5. Produits séchés ou évaporés

L'industrie agroalimentaire génère une quantité importante de produits différents suivant un grand nombre de procédés de fabrication. Les différentes étapes de production des principaux produits de l'industrie des viandes, de l'industrie des boissons et de l'industrie de transformation du lait sont ici représentées de manière simplifiée sous forme de cheminement typique.

Un système de "puces" renvoie aux technologies efficaces sur le plan énergétique et aux méthodes d'optimisation énergétique ("puces" carrées) ainsi qu'à certains exemples d'applications typiques ("puces" rondes) décrits aux parties E et F.

Technologie Puce renvoyant à une technologie efficace sur le plan énergétique ou à une méthode d'optimisation énergétique.

Exemple Puce renvoyant à un exemple d'application industrielle de la technologie ou de la méthode à laquelle elle est associée.

C. Principales Étapes de Fabrication

C.1. L'industrie des viandes et volailles

C.1.1. Abattage et transformation de porcs

RÉCEPTION DES ANIMAUX

ÉTOURDISSEMENT

SAIGNÉE

LAVAGE

ÉCHAUDAGE / ÉPILATION

FLAMBAGE / GRATTAGE

ABLATION DES PIEDS

ÉVISCÉRATION

INSPECTION

SÉPARATION EN 1/2 CARCASSES

PRÉPARATION DES PANNES

PESÉE

RESSUAGE

TRANSFORMATION

Technologies applicables à l'ensemble de l'usine

F.1	"Monitoring & Targeting" (tous sites)
F.2	Intégration des Procédés (grandes usines)

E.2.2	**E.7.1●**	
E.5.1	**E.7.1●**	
E.5.2	**E.7.1●**	

Technologie	**Exemple**

C.1.2. Abattage et transformation de bovins

RÉCEPTION DES ANIMAUX

ÉTOURDISSEMENT

SAIGNÉE

ABLATION DES PIEDS

DÉPOUILLE VENTRALE

DÉPOUILLE PIEDS & COLLIER

ARRACHAGE DU CUIR

ÉVISCÉRATION

INSPECTION

SÉPARATION EN 1/2 CARCASSES

PARAGE

PESÉE

RESSUAGE

TRANSFORMATION

Technologies applicables à l'ensemble de l'usine

F.1	"Monitoring & Targeting" (tous sites)
F.2	Intégration des Procédés (grandes usines)

E.3

E.5.2 **E.7.1**

Technologie **Exemple**

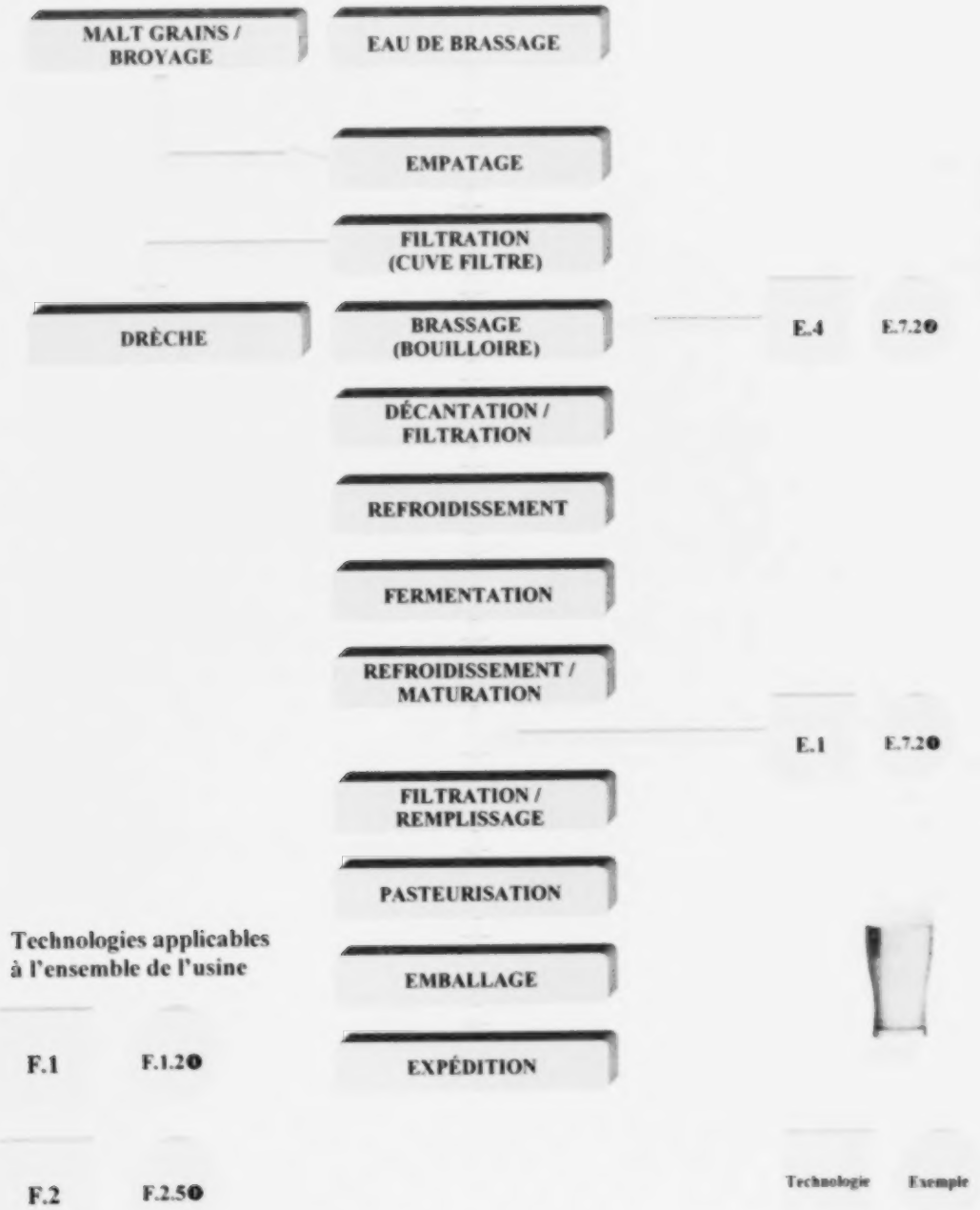
C.1.3. Abattage et transformation de poulets

Technologies applicables à l'ensemble de l'usine

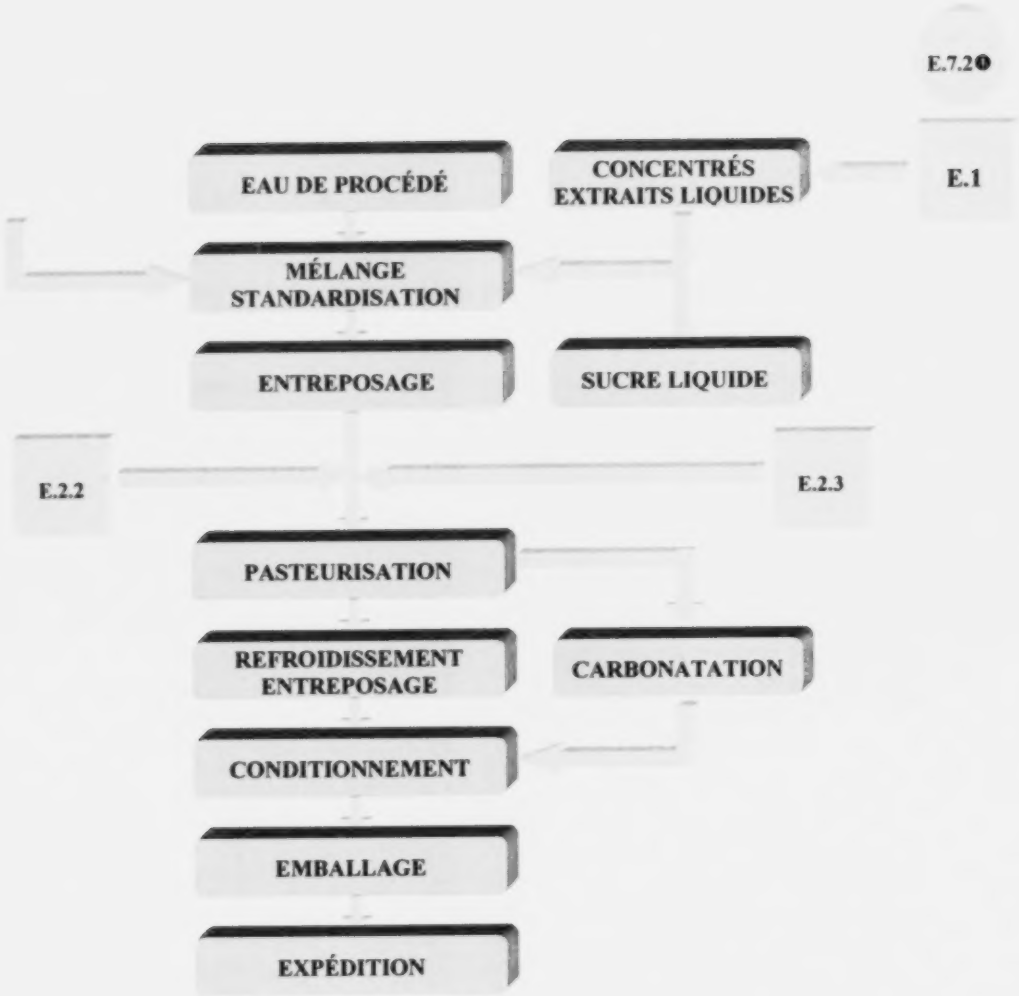
F.1		"Monitoring & Targeting" (tous sites)		
F.2	**F.2.5**	Intégration des Procédés (grandes usines)	**Technologie**	**Exemple**

C.2. L'industrie des boissons

C.2.1. Bière



C.2.2. Boissons douces

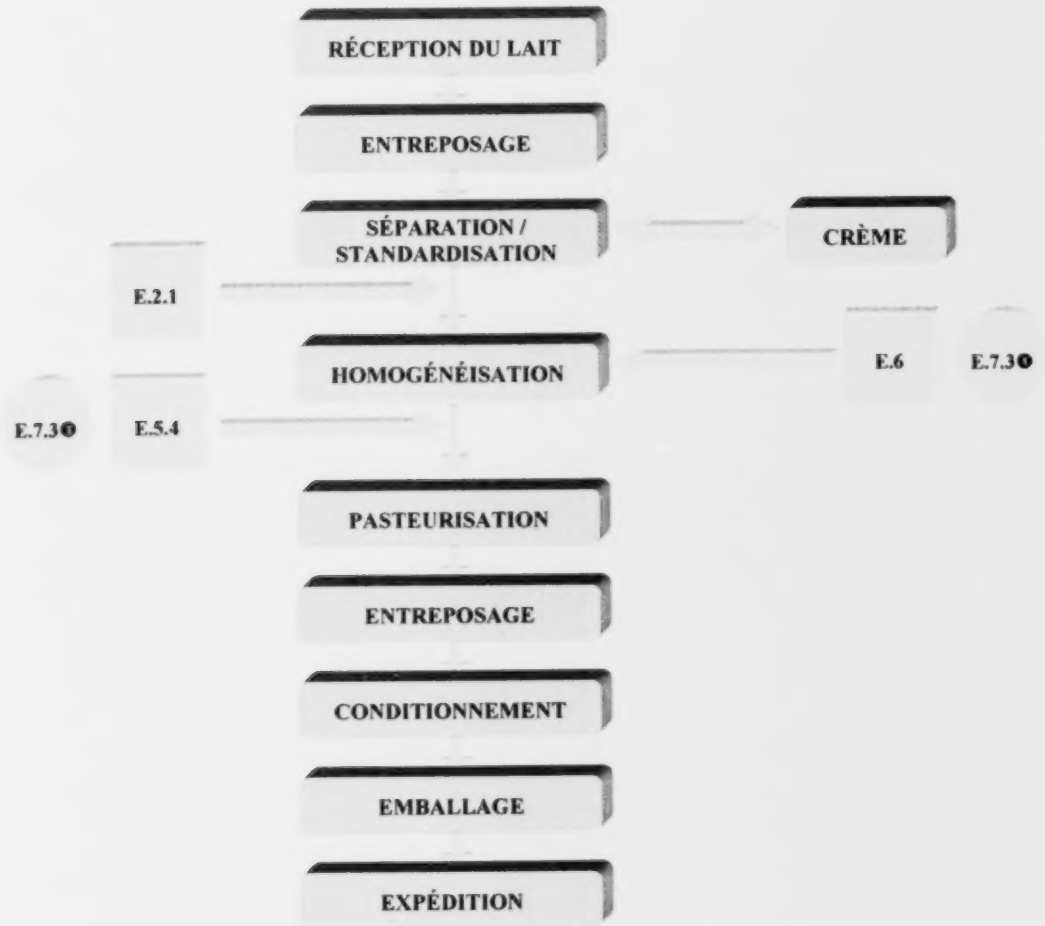


Technologies applicables à l'ensemble de l'usine

F.1	"Monitoring & Targeting" (tous sites)		
F.2	Intégration des Procédés (grandes usines)	**Technologie**	**Exemple**

C.3. L'industrie de la transformation du lait

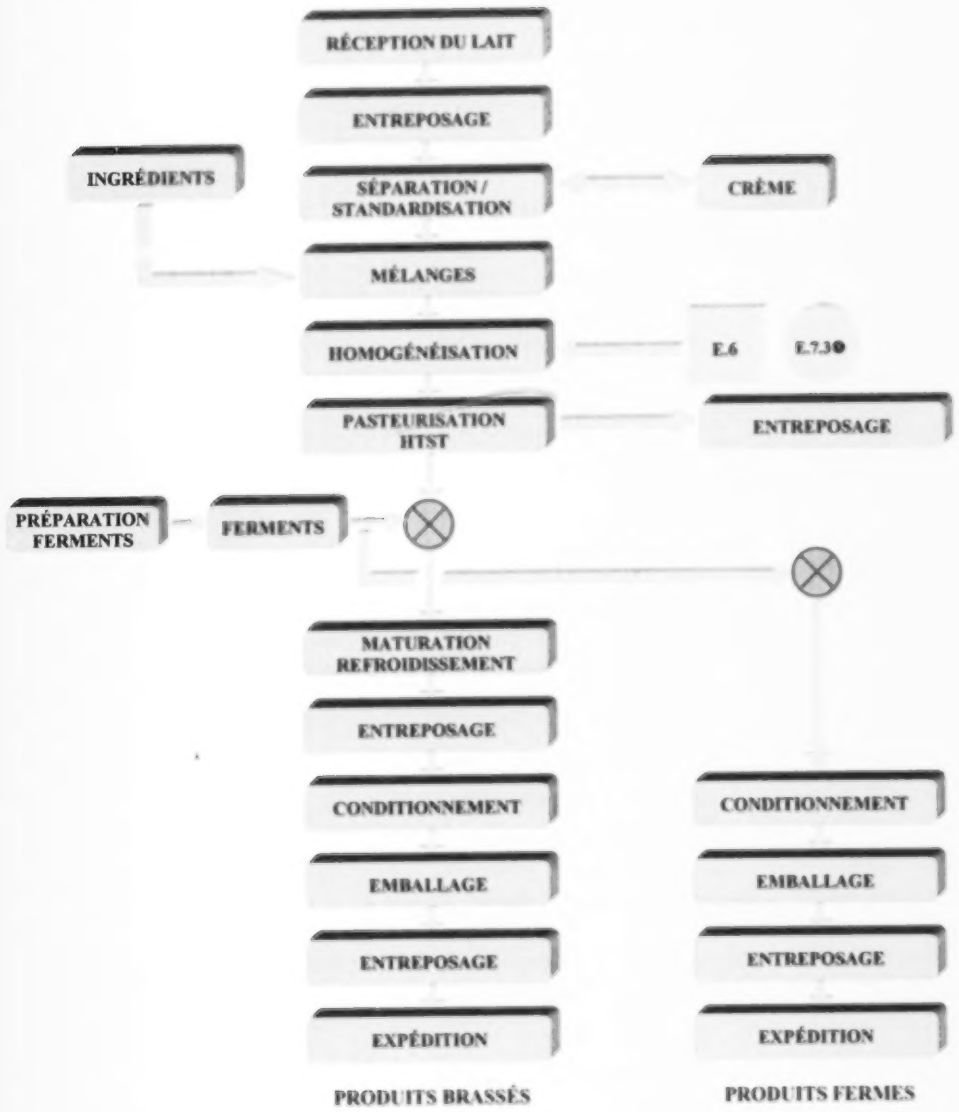
C.3.1. Lait de consommation



Technologies applicables à l'ensemble de l'usine

F.1	"Monitoring & Targeting" (tous sites)		
F.2	Intégration des Procédés (grandes usines)	**Technologie**	**Exemple**

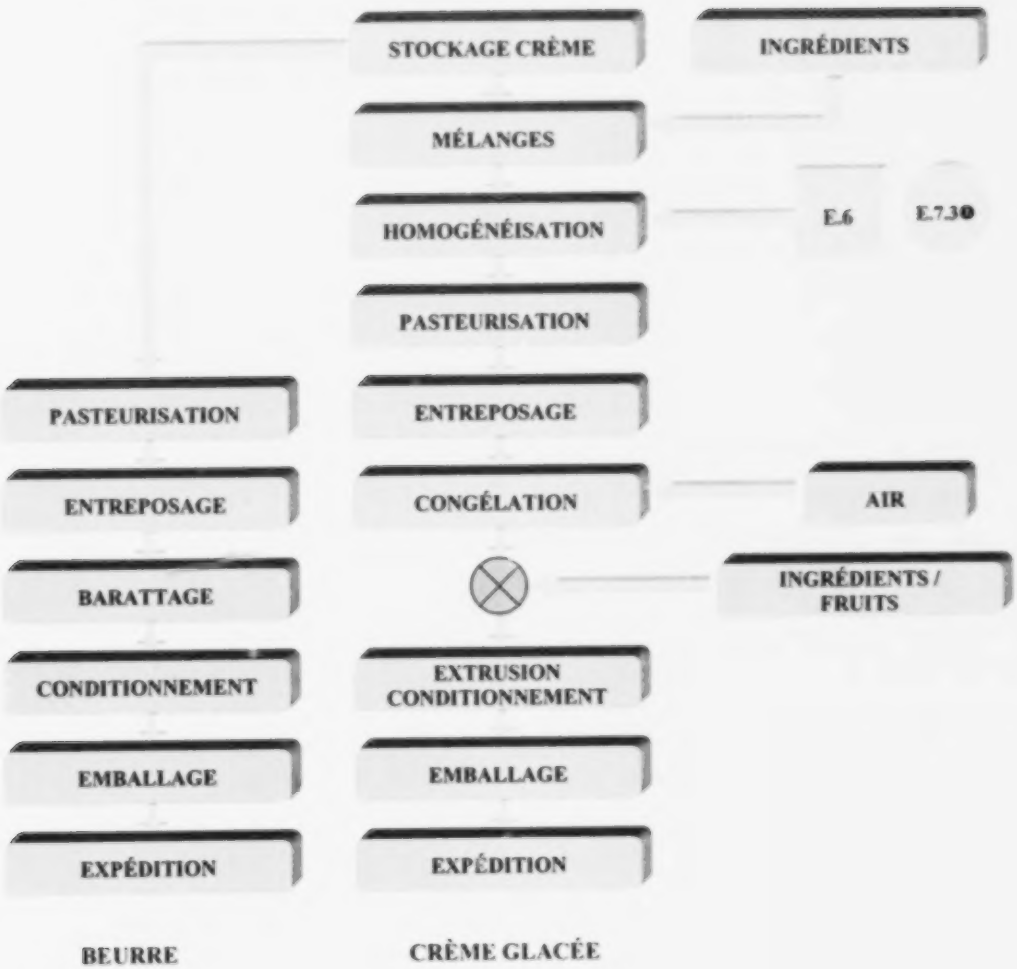
C.3.2. Produits laitiers de culture



Technologies applicables à l'ensemble de l'usine

F.1	"Monitoring & Targeting" (tous sites)		
F.2	Intégration des Procédés (grandes usines)	**Technologie**	**Exemple**

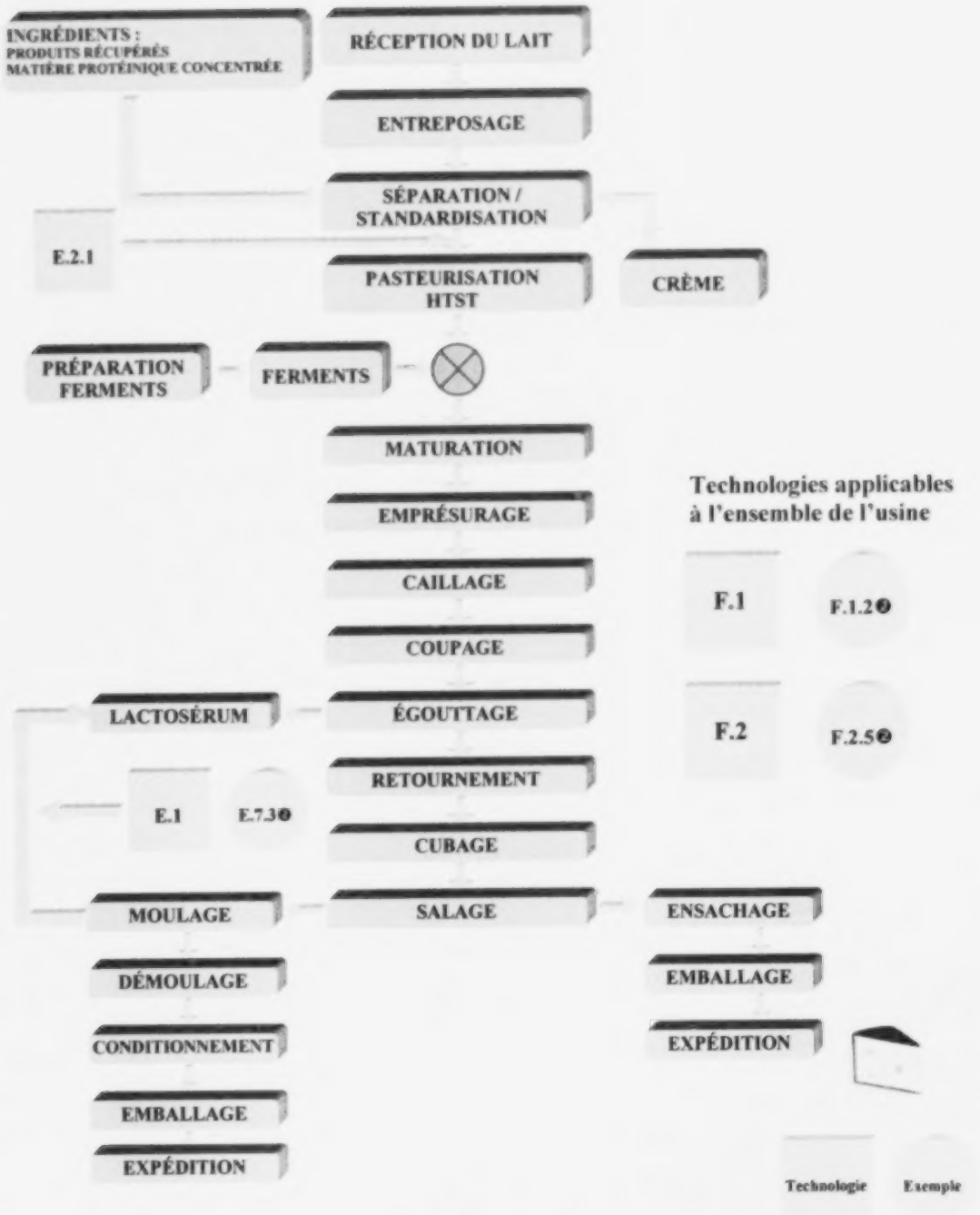
C.3.3. Beurre et crème glacée



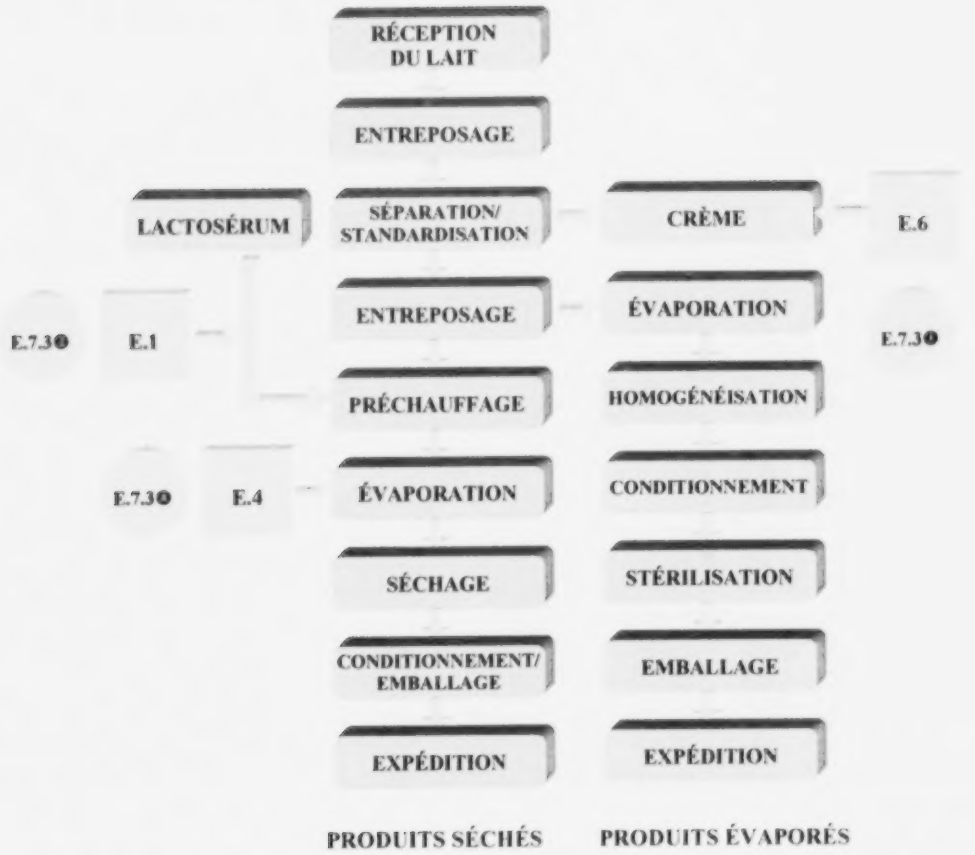
Technologies applicables à l'ensemble de l'usine

F.1	"Monitoring & Targeting" (tous sites)	
F.2	Intégration des Procédés (grandes usines)	Technologie / Exemple

C.3.4. Fromage


INGRÉDIENTS :
PRODUITS RÉCUPÉRÉS
MATIÈRE PROTÉINIQUE CONCENTRÉE
RÉCEPTION DU LAIT
ENTREPOSAGE
SÉPARATION / STANDARDISATION
E.2.1
PASTEURISATION HTST
CRÈME
PRÉPARATION FERMENTS
FERMENTS
MATURATION
EMPRÉSURAGE
CAILLAGE
COUPAGE
LACTOSÉRUM
ÉGOUTTAGE
RETOURNEMENT
E.1
E.7.3
CUBAGE
MOULAGE
SALAGE
ENSACHAGE
DÉMOULAGE
EMBALLAGE
CONDITIONNEMENT
EXPÉDITION
EMBALLAGE
EXPÉDITION
Technologies applicables à l'ensemble de l'usine
F.1
F.1.2
F.2
F.2.5
Technologie
Exemple

C.3.5. Produits séchés ou évaporés



Technologies applicables à l'ensemble de l'usine

F.1	"Monitoring & Targeting" (tous sites)
F.2	Intégration des Procédés (grandes usines)

Technologie	Exemple

D. MESURES TRADITIONNELLES D'AMÉLIORATIONS DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

D.1. Motivation du personnel à l'économie d'énergie

D.2. Gestion de la consommation électrique
- D.2.1. Approvisionnement électrique
- D.2.2. Moteurs
- D.2.3. Éclairage

D.3. Air comprimé

D.4. Chauffage, ventilation et climatisation (CVC)

D.5. Réfrigération et refroidissement

D.6. Production et distribution de vapeur

D.7. Gestion de l'eau

De nombreuses mesures d'efficacité énergétique ont déjà fait leur preuve dans le milieu industriel. Nécessitant des investissements d'importances très variables mais souvent mineurs, elles sont applicables dans l'industrie des aliments et boissons.

Cette partie vise à souligner les principales étapes et voies à explorer dans le cadre d'une démarche d'amélioration de l'efficacité énergétique depuis l'engagement de la direction et l'implication du personnel jusqu'aux mesures d'efficacité les plus souvent rencontrées sur la consommation électrique, la production et la distribution de l'air comprimé, les systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation), la réfrigération et le refroidissement, la production et distribution de vapeur ainsi que sur l'utilisation de l'eau dans l'industrie.

Pour plus de détails, le lecteur se référera à l'abondante littérature publiée sur le sujet et dont une partie est fournie à l'Annexe 2 du guide.

D. Mesures Traditionnelles d'Améliorations de l'Efficacité Énergétique

D.1. Motivation du personnel à l'économie d'énergie

Le succès de tout programme visant à réduire la consommation énergétique au sein d'une entreprise repose sur l'implication de l'ensemble des employés de l'entreprise, et ceci quelle que soit leur position dans la structure hiérarchique. À cet effet, chacun doit être conscient du rôle et de l'impact qu'il peut avoir, y compris par de petits gestes de tous les jours.

Un programme de sensibilisation, d'information et de motivation du personnel doit donc être la pierre angulaire de toute politique visant à réduire la consommation d'énergie. Il permet aux employés d'être informés sur les objectifs de la direction et de l'importance qu'elle accorde aux projets d'économie d'énergie.

Niveau et degré d'implication des divers employés d'une usine

Thèmes	Postes			
	Direction	Cadres	Spécialistes	Opérateurs
Sensibilisation	✓	✓✓✓	✓	✓
Utilisation de l'énergie	✓	✓	✓	✓✓
Encouragement des autres	✓	✓✓	✓✓✓	✓✓
Politique énergétique	✓✓✓	✓✓	✓	
Mise en place de procédés éconergétiques	✓	✓✓	✓✓✓✓	✓
Amélioration continue	✓	✓	✓✓✓✓	✓✓✓✓

Une matrice d'implication (*voir ci-contre*), où l'ensemble des postes de l'entreprise est représenté, permet généralement de clarifier le rôle attendu de chacun.

Quelques suggestions pour faire prendre conscience de l'importance de l'énergie dans les coûts de production

- ✓ Quelqu'un qui n'est pas convaincu ne peut pas convaincre une autre personne : informer et s'informer de la part de l'énergie dans les coûts de production.
- ✓ Évaluer ce que chaque pour-cent d'économie d'énergie implique au niveau des profits.
- ✓ Expliquer que toute réduction de la consommation énergétique se répercute automatiquement sur la marge de profit de l'entreprise.
- ✓ Fournir de l'information régulièrement réactualisée sur la consommation énergétique et les coûts rattachés à l'énergie.
- ✓ Obtenir des statistiques sur la consommation spécifique d'énergie (MJ/unité de production) du secteur et positionner l'entreprise par rapport au reste du secteur et aux meilleures usines comparables.
- ✓ Utiliser des graphiques et diagrammes pour appuyer le message.
- ✓ Expliquer et montrer comment les économies d'énergie affectent la profitabilité de l'entreprise, sa compétitivité et les liens avec la croissance et la sécurité de l'emploi.

De nombreuses solutions pour réduire la consommation d'énergie peuvent venir des employés

- ✓ Former des groupes de travail regroupant différents secteurs de l'usine. Leur fournir la formation nécessaire en matière d'efficacité énergétique. Mettre ces personnes en évidence et en faire des références pour les autres employés.
- ✓ Encourager les employés à identifier et à rapporter les possibilités d'économie d'énergie et veiller à ce qu'ils disposent des moyens pour les mettre en œuvre.
- ✓ S'assurer que les employés sont reconnus pour leur implication.
- ✓ Dans une entreprise engagée dans un programme d'efficacité, le directeur de l'usine disait : "Il faut favoriser au maximum les échanges d'idées… L'employé affecté à une tâche est la personne la mieux placée pour concevoir des idées nouvelles…"

Les employés sont souvent directement affectés par les changements : sont-ils motivés à économiser l'énergie?

- ✓ Mettre en place une information continue (par exemple, un tableau d'affichage illustrant les performances énergétiques, une chronique dans le journal de l'usine, etc.).
- ✓ Saluer les initiatives en matière d'économie d'énergie (par exemple, implanter un concours récompensant les réussites et les nouvelles idées, etc.).
- ✓ Présenter le programme de réduction de la consommation énergétique comme prioritaire et introduire la contribution au programme d'économie d'énergie dans les objectifs de travail.
- ✓ S'assurer que les personnes aient le crédit de leur implication personnelle. Prendre le temps d'aller féliciter et encourager les personnes afin qu'elles soient conscientes de l'importance de leur action dans le processus.

Les meilleures idées de réduction de la consommation d'énergie n'ont aucun impact si les employés ne les mettent pas en pratique et si la direction ne leur donne pas les moyens de les mettre en œuvre.

D.2. Gestion de la consommation électrique

L'électricité occupe une part non négligeable de la consommation d'énergie de l'industrie agroalimentaire : en fonction des secteurs, 25 à 45% des besoins énergétiques sont d'origine électrique et, pour certains sites particuliers cette part peut même être plus élevée. Il est donc important d'y prêter attention lors de la mise sur pied d'un programme d'efficacité énergétique. L'expérience montre qu'en changeant légèrement les habitudes d'opération et en apportant quelques modifications aux équipements électriques, il est possible de diminuer les coûts d'électricité de façon appréciable.

D.2.1. Approvisionnement électrique

Connaître le mode de facturation pour l'approvisionnement électrique de l'entreprise est très important car une grande partie de la facture peut parfois être diminuée à l'aide de moyens très simples. Normalement, les compagnies d'utilité électrique ont une tarification qui tient compte de la quantité d'électricité consommée mais aussi de la puissance maximale appelée ou "appel de puissance".
L'appel de puissance est la demande maximale appelée durant une certaine période. Cette valeur maximale est obtenue d'après le profil de charge de l'usine (un exemple est illustré plus loin) et détermine une partie de la tarification pour le reste de la période. Cette pointe est souvent provoquée par le démarrage d'équipements énergivores combiné au fonctionnement simultané de plusieurs appareils.

Pour gérer efficacement la puissance maximale appelée (appel de puissance)…

- ✓ Demander au distributeur d'électricité le profil de charge de l'usine.
  Le profil de charge permettra de déterminer les moments où se produisent les pointes et d'identifier les équipements qui les provoquent. Il permettra également de choisir la meilleure tarification parmi celles proposées par le distributeur.
- ✓ Demander au distributeur des conseils pour réduire sa consommation l'électricité, diminuer la puissance maximale appelée et améliorer le facteur de puissance de l'usine.
- ✓ Échelonner le démarrage des équipements particulièrement énergivores.
  Lors de la phase de démarrage, les moteurs électriques peuvent utiliser jusqu'à 5 ou 7 fois la quantité de courant utilisée à pleine charge et peuvent ainsi créer un fort appel de puissance.
- ✓ Planifier la mise sous tension des appareils les plus énergivores en premier.
  Une petite pointe sur une grande demande est beaucoup moins coûteuse qu'une grande pointe sur une grande demande.
- ✓ Considérer l'arrêt de certains équipements afin d'abaisser l'appel de puissance pour la duré de la mise en marche d'un équipement très énergivore.
  La pointe d'appel de puissance de certains appareils peut durer plusieurs minutes et même jusqu'à 15 minutes.
- ✓ Pendant les périodes de pointe, planifier la mise hors tension des équipements qui ne sont pas nécessaires comme par exemple, certains systèmes de CVC ou l'éclairage à certains endroits qui peuvent bénéficier de la lumière naturelle.
- ✓ Installer des dispositifs limitant l'appel de puissance lors du démarrage d'appareils énergivores ; *une baisse substantielle de la facture d'électricité peut être obtenue.*
- ✓ Prendre en considération les variations de tarifs selon la période pour les endroits dont les tarifs sont plus bas la nuit ou à certaines heures du jour.

Le recours au stockage thermique (utilisation de banque à glace notamment) ou à une augmentation de production pendant les périodes creuses peut s'avérer intéressant.

- ✓ Évaluer la possibilité d'utiliser les équipements énergivores la nuit ou de les démarrer avant la période de pointe.
- ✓ Évaluer s'il est possible de concentrer dans une période hors pointe le travail à faire par un appareil énergivore. L'appareil peut être opéré très tôt le matin, avant la période de pointe, ou encore à la fin de la journée, après la période de pointe.

La facturation électrique peut tenir compte de différents paramètres :

☛ *De la catégorie demandée ou nécessaire pour le client. Celle-ci tient compte de la puissance maximale demandée par le client et de son profil de charge. Selon le fournisseur, elle peut aussi varier si le client permet à son fournisseur d'être débranché si certaines conditions particulières sont remplies.*

☛ *De la consommation d'électricité du mois.*

☛ *De la puissance maximale appelée. Celle-ci est la puissance maximale, soutenue pendant une certaine période (15 minutes), demandée durant la période de facturation (généralement un mois). Cet appel de puissance est facturé à un certain montant par kilowatts maximal demandé au cours de la période. Par une bonne gestion des démarrages d'équipements énergivores il est possible de diminuer l'appel de puissance de pointe. Une diminution de 50 kW, peut entraîner une économie annuelle de 7 200 $ (pour un montant facturé par le fournisseur d'environ 12 $/kW).*

☛ *Des pénalités peuvent être ajoutées pour le dépassement de la puissance souscrite selon la catégorie demandée.*

D.2.2. Moteurs

Les moteurs comptent pour une partie importante de la consommation électrique dans le secteur agroalimentaire. On les retrouve aussi bien dans les procédés de fabrication que dans la production d'utilités telles que l'air comprimé, la réfrigération ou la climatisation. Plusieurs actions peuvent être engagées pour en diminuer les coûts d'utilisation et des études récentes ont estimé que deux-tiers des moteurs en fonctionnement pouvaient bénéficier de telles mesures.

☛ *Les moteurs à courant continu sont facilement contrôlables et sont souvent choisis pour des contrôles de couple et de vitesse précis.*

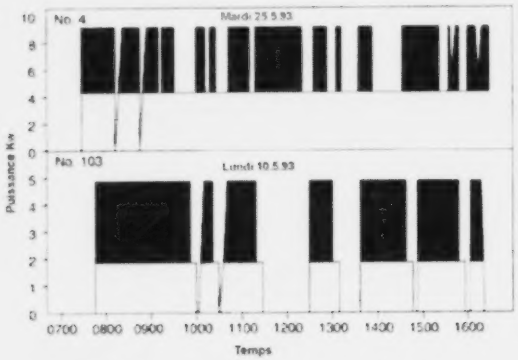
☛ *Les moteurs synchrones ont une grande efficacité et permettent la correction du facteur de puissance. Ces moteurs sont choisis pour des applications à charge constante.*

☛ *Les moteurs triphasés sont les moteurs les plus répandus dans l'industrie. Ils sont robustes, peu dispendieux et disponibles dans une large gamme de puissance.*

Jusqu'à 50% de l'énergie utilisée par un moteur peut être économisée par un bon dimensionnement, une bonne gestion du procédé, en minimisant le temps d'attente et en effectuant une bonne maintenance.

Optimiser le temps de fonctionnement d'un moteur

- ✓ Arrêter les moteurs des appareils non utilisés.
- ✓ Installer des minuteries sur certains appareils.
- ✓ Installer des interrupteurs minimisant les appels de puissance pour les appareils à arrêts et démarrages fréquents.



> ☞ *Dans une entreprise, deux presses n'étaient pas utilisées en permanence mais étaient sous tension toute la journée.*
>
> *L'installation d'une minuterie d'arrêt autonatique a permis de diminuer la consommation énergétique lors des temps d'attente. Les presses étaient inutilisées pendant 27% du temps d'opération en moyenne. La figure ci-contre montre la différence de consommation entre une presse conventionnelle comparativement à une presse qui est pourvue d'une minuterie.*
> ☞ *Retour sur l'investissement de 12 mois (utilisation de 78 heures par semaine et 48 semaines par année).*

Utiliser des moteurs adaptés aux besoins

- ✓ Les moteurs électriques sont souvent surdimensionnés et, par conséquent, fonctionnent régulièrement en dessous de leur plage optimale : considérer le remplacement d'un moteur trop gros.
- ✓ La plupart des moteurs sont conçus pour fonctionner le plus efficacement entre 75 et 100% de charge.

  A des charges inférieures, l'efficacité d'un moteur peut diminuer considérablement, entraînant une augmentation des coûts énergétiques.

> ☞ *Dans une brasserie japonaise, environ 3300 moteurs à induction sont employés. Plusieurs d'entre eux fonctionnent sous une grande charge et la plupart sont contrôlés par étranglement. Une analyse de 450 moteurs de plus de 11 kW a démontré que 13 d'entre eux avaient un potentiel intéressant pour l'installation de moteurs à vitesse variable avec un retour sur l'investissement de moins de 5 ans. Cinq (5) machines ont été sélectionnées pour l'essai.*
> ☞ *Économies d'énergie variant de* ***32% à 65%*** *pour un retour sur l'investissement global de* ***moins de 2 ans***.

- ✓ Comparer, en coût de capital et d'opération, l'achat d'un moteur standard et d'un moteur à haute efficacité lors du remplacement.

  Le coût en électricité sur la durée de vie d'un moteur (10 ans) peut atteindre 75 fois son coût d'achat.
- ✓ Un moteur à reconditionner ou à remplacer : pensez à un moteur à haute efficacité.

  Un moteur à haut rendement est généralement de 3 à 8% plus efficace qu'un moteur standard.

  Le recours à un moteur à haut rendement permet de réduire non seulement la consommation électrique mais aussi la puissance appelée.

  Dans certains cas, un moteur à haut rendement peut également contribuer à améliorer le facteur de puissance de l'usine.
- ✓ Considérer le remplacement des courroies et poulies standards par des courroies crantées et des poulies dentées. *L'utilisation de courroies à couple élevé est aussi envisageable. Les gains relatifs à l'utilisation de ces courroies varient entre 2% et 6%.*

- ✓ Considérer l'utilisation de moteurs à vitesse variable. La puissance demandée par un moteur étant proportionnelle au cube de sa vitesse de rotation ($P \alpha \omega^3$), ce type de moteur utilisera moins de puissance à basse vitesse et ne nécessitera pas de système mécanique de contrôle de débit (recirculation, vannes).

Vitesse de rotation (RPM)	Rappoprt de puissance demandée en fonction de la vitesse
500	1
1000	8
2500	125
5000	1000

Privilégier la maintenance préventive

- ✓ Vérifier la lubrification des roulements à billes.
- ✓ Vérifier l'état des roulements à billes et des courroies de transmission.
- ✓ L'analyse vibratoire (capteurs de vibrations) permet de s'assurer que les équipements fonctionnent correctement et sont en bon état. Utilisée en maintenance préventive, elle permet de réduire le taux de bris de matériel et de changer moins de pièces.

D.2.3. Éclairage

L'éclairage est souvent négligé lorsqu'il est question de mesures d'économie d'énergie. Pourtant, de simples mesures accompagnées de faibles investissements peuvent réduire considérablement l'énergie consommée par les systèmes d'éclairage.

Type de tâche ou d'activité	Luminosité (lux)	Examples
Aire de stationnement extérieur	20	
Entrée de bâtiment	50	
Tâches effectuées occasionnellement	150	Entrepôts
Allées intérieures	150	Corridors
Tâches nécessitant peu de minutie	300	
Tâches nécessitant de la minutie	750	
Bureaux	750	
Inspection	1500	Produit fini

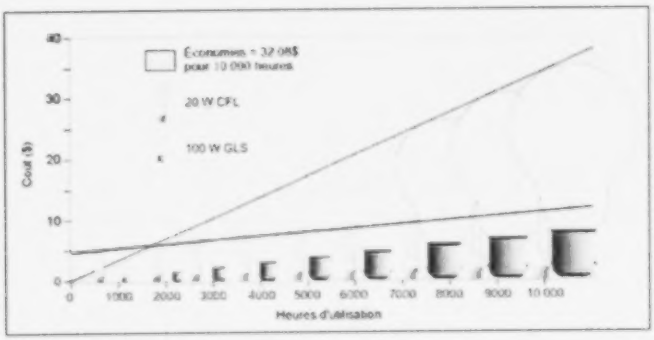
Un éclairage adapté et de qualité

- ✓ Sensibiliser les employés à fermer la lumière lorsqu'ils sont les derniers à sortir d'un local.
- ✓ S'assurer d'avoir un éclairage adapté aux activités réalisées dans un local.

  L'énergie consommée par l'éclairage dans un entrepôt réfrigéré doit être compensée par le système de réfrigération pour évacuer la chaleur dégagée par les lampes.
- ✓ Enlever les ballasts d'éclairage par tubes fluorescents et les lampes à vapeur de sodium à haute pression inutilisés car ils continuent à consommer de l'électricité même si les tubes et les ampoules ont été enlevés.
- ✓ Installer des commutateurs d'éclairage à détecteurs de mouvement dans les endroits où il n'y a pas de personnel en permanence.
- ✓ Nettoyer les puits de lumière et les fenêtres régulièrement pour maximiser l'apport de lumière naturelle.

Type de lampe	Durée d'inactivité prévue (min)
Fluorescent	15 +
Vapeur de sodium	60 +

- ✓ Utiliser un éclairage par zone dans les grands espaces. Il est ainsi possible d'éclairer seulement la partie utilisée de la pièce.
- ✓ Évaluer s'il est préférable d'utiliser un éclairage diffus à l'aide de lampes peu énergivores ou un faible éclairage diffus combiné à des lumières pour chaque poste de travail.
- ✓ Remplacer les vieux ballasts par des ballasts éconergétiques. Ce changement peut aussi améliorer le facteur de puissance si celui-ci est bas.
- ✓ Remplacer, dans les locaux à plafond haut, les tubes fluorescents et les lampes à vapeur de mercure par des lampes au sodium ou à halogène. Remplacer les tubes fluorescents ordinaires par des tubes à haut rendement énergétique lorsque ceux-ci doivent être changés.



Type d'éclairage	Eff. d'une lampe (lumen/watt)	Durée de vie (heures)	Coût en capital	Coût en entretien
Incandescent	10-35	1 000+	Faible	Élevé
Fluorescent	40-100	10 000+	Moyen	Moyen
Vapeur de sodium (HP)	50-140	20 000+	Élevé	Faible

D.3. Air comprimé

L'air comprimé est largement utilisé dans l'industrie pour le contrôle (commandes pneumatiques), le fonctionnement de certains équipements, les procédés de séparation, le transport des matières ou la pulvérisation de liquides. Dans l'industrie agroalimentaire, les compresseurs d'air sont responsables d'environ 7% de la consommation électrique du secteur mais ils peuvent représenter jusqu'à 20% dans certains sous-secteurs tels que la transformation du lait ou la fabrication de la bière. On peut noter que l'air comprimé est souvent considéré comme une ressource peu dispendieuse et pratique alors que les coûts énergétiques liés à son utilisation peuvent devenir rapidement importants si l'on ne se soucie pas de son utilisation rationnelle.

> ☞ *La génération d'air comprimé est très énergivore et l'efficacité des systèmes de production très faible : **seulement 5%** de l'électricité utilisée est transformée en énergie mécanique, le reste étant dissipé en chaleur... en grande partie récupérable.*
>
> ☞ ***0,11 kWh/m³** d'air comprimé (à environ 800 kPa ou 120 psig) est une consommation spécifique reconnue comme raisonnablement accessible.*

Sur une période de 10 ans, on estime que 75% des coûts liés à l'air comprimé sont pour l'énergie et les 25% restant pour les équipements et la maintenance.

En général, des réductions importantes de la consommation énergétique peuvent être assez facilement obtenues :

❶ Une récupération de **10% à 40%** de l'électricité consommée par les compresseurs simplement en alliant maintenance préventive des systèmes de production et de distribution et respect de bonnes pratiques d'utilisation (*retour sur investissement inférieur à 6 mois*).

❷ **Potentiel additionnel** à l'aide de mesures plus coûteuses, notamment de récupération de chaleur (*retour sur investissement normalement inférieur à 3 ans*).

Maintenir le réseau de distribution en bon état : le négliger s'avère coûteux

✓ Combattre les fuites : elles sont une source importante d'inefficacité et représentent un coût important.

Les fuites peuvent représenter jusqu'à 60% de l'air comprimé produit.

Diamètre de la fuite (mm)	Débit de fuite (l/s)	Coût mensuel ($)
1	1	10
3	10	111
5	27	298
10	105	1182

Calculs pour un système à 600 kPa effectifs et un coût d'électricité de 0,05 $/kWh

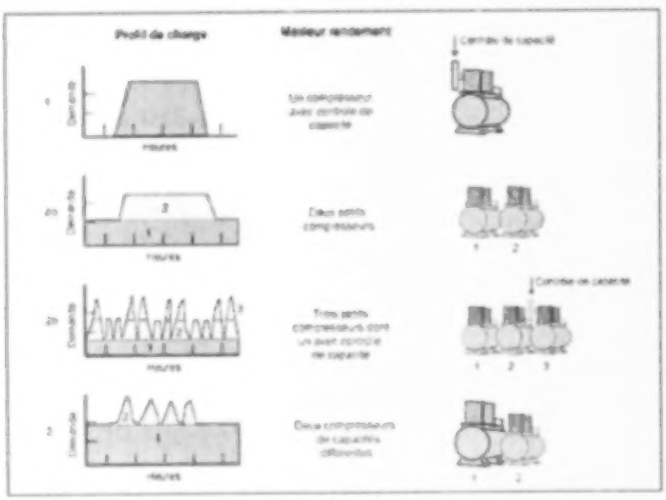
✓ Instaurer un plan de mesures préventives de détection de fuites d'air. Celui-ci peut se faire par inspection, par la variation de pression dans une section isolée ou à l'aide de débitmètres sur différentes sections du réseau de distribution.

✓ Noter les endroits du réseau où il y a des chutes de pression. Distinguer celles créées par le procédé de celles provoquées par des fuites que l'on réparera au plus vite.

- ✓ Démanteler les sections du réseau non utilisées et installer des valves d'isolement sur les sections rarement utilisées.
- ✓ S'assurer que le système est sec : l'accumulation d'eau dans les tuyaux peut poser certains problèmes de corrosion, de pertes de charges, etc. Si nécessaire, corriger l'inclinaison de la tuyauterie vers les points de drainage.
- ✓ Vérifier que les dimensions des conduites sont adaptées aux besoins (V_{air} < 6 m/s sur le réseau principal). *Par exemple, pour un système de 3 compresseurs (2 x 190 kW, 1 x 90 kW) associé à un réseau de 250 m, augmenter le diamètre des tuyaux de 80 à 100 mm permet d'économiser 37 000 kWh/an, soit 1 850 $/an.*

Il y a de l'air dans les conduites, mais est-il produit de façon optimale ?

- ✓ Installer un compresseur adapté aux besoins : un compresseur surdimensionné ne fonctionne pas à pleine charge et présente une efficacité moindre.
- ✓ Évaluer s'il existe des alternatives aux opérations qui nécessitent l'utilisation de l'air comprimé.
- ✓ Identifier l'utilisation qui requiert la pression la plus élevée et ajuster la pression délivrée par le compresseur à ce niveau. Il peut parfois être intéressant de réaliser un réseau indépendant à plus haute pression pour satisfaire la demande correspondante.
  Pour un compresseur usuel opérant entre 700 et 900 kPa (100 à 130 psig), toute réduction de 50 kPa permet de réduire d'environ 4% la consommation énergétique.
- ✓ Utiliser un air d'alimentation le plus froid et le plus sec possible (air extérieur en hiver) : cet air est plus dense et requiert moins d'énergie pour être comprimé.
  Toute réduction de 3°C de la température de l'air d'alimentation d'un compresseur permet de réduire de 1% sa consommation énergétique.
- ✓ Placer un compresseur hors tension lorsque l'air comprimé n'est pas utilisé pendant de longues périodes telles que la nuit. Ainsi, il n'a pas à compenser les pertes quand le système n'est pas utilisé.
- ✓ Maintenir les compresseurs à vis à plein régime lorsqu'ils fonctionnent en parallèle avec des compresseurs à piston. *Utiliser de préférence les compresseurs à piston pour les charges partielles.*
- ✓ Choisir la combinaison de compresseurs la mieux adaptée aux caractéristiques de la demande (profil de charge) : constante, fluctuante, à base constante et avec des pointes de demande, etc.
  Comme un compresseur atteint son meilleur rendement à pleine charge, il est plus efficace d'utiliser une combinaison contrôlée de plusieurs compresseurs pour satisfaire une charge variable qu'un seul gros compresseur fonctionnant la plupart du temps à charge partielle.



Une grande partie de l'énergie nécessaire à la production d'air comprimé est récupérable

- ✓ Plus de 80% de l'énergie consommée peut être récupérée sous forme thermique pour chauffer des locaux, préchauffer un air de combustion, produire de l'eau chaude ou être utilisée par les procédés de fabrication. Si la solution du chauffage des locaux est retenue, on veillera à évacuer l'air chaud provenant des compresseurs à l'extérieur des bâtiments l'été.

  Un compresseur refroidi à l'air peut fournir de l'air chaud jusqu'à 80 °C et un compresseur refroidi à l'eau peut produire de l'eau chaude jusqu'à 95 °C qui peuvent être utilisés pour le chauffage des locaux ou par certains procédés.

D.4. Chauffage, ventilation et climatisation (CVC)

Les équipements de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) sont utilisés pour le conditionnement de l'air, c'est-à-dire le maintien d'un certain confort en réglant la température et l'humidité des locaux (bureaux, ateliers, bâtiments, etc.) dans des limites acceptables. Dans l'industrie manufacturière, la part des coûts énergétiques associés aux systèmes CVC n'est pas très importante. Pour le secteur agroalimentaire en particulier, elle représente entre 3% et 10% (5% en moyenne) de l'énergie consommée selon la taille, l'implantation géographique du site et le type de production.
Cependant, des réductions significatives de consommation énergétique peuvent être obtenues :

- **10% à 25%** à l'aide de mesures peu coûteuses (*retour sur investissement inférieur à 6 mois*) telles que la mise en place d'un programme d'entretien préventif ou le respect de bonnes pratiques comme éviter de surchauffer l'hiver et trop refroidir l'été, et même dans certains cas de climatiser et de chauffer en même temps.
- **30% à 40%** à l'aide de mesures moyennement coûteuses (*retour sur investissement inférieur à trois ans*) telles que l'amélioration énergétique des équipements ou la mise en place de systèmes de contrôle plus performants.

Satisfaire aux critères de confort à moindre coût

- ✓ Les systèmes de CVC doivent être entretenus au même titre qu'un équipement d'usine : nommer un responsable (interne ou externe) pour leur entretien régulier et tenir compte de leur utilisation saisonnière.
- ✓ Ajuster adéquatement les points de consigne des thermostats d'ambiance, voire au minimum de la zone confort.

> ☞ *Diminuer (augmenter) la température d'une pièce de 1 ou 2°C peut réduire les coûts de chauffage (climatisation) de 5 à 10%.*

- ✓ Installer des thermostats électroniques qui permettent d'adapter la climatisation des locaux à l'activité des différents départements de l'entreprise.
- ✓ Réduire au minimum (arrêter lorsque cela est possible) la climatisation en dehors des plages horaires de travail de vos employés (nuits, fins de semaines) et lors des périodes d'arrêts prolongés.

> ☞ *Réduire le chauffage à son minimum le soir (entre 17:00 et 08:00 le lendemain matin) et la fin de semaine peut réduire les coûts de chauffage de 5 à 10%.*

- ✓ Veiller à ce que seules des personnes autorisées puissent ajuster les thermostats des espaces communs.
- ✓ Vérifier régulièrement le bon fonctionnement des thermostats.
- ✓ Vérifier les besoins réels de l'entreprise : ne pas chauffer, ventiler ou climatiser inutilement les locaux qui sont peu ou pas fréquentés par le personnel (certains entrepôts, couloirs, etc.).

Utiliser au mieux l'air chaud disponible dans l'usine et limiter les pertes

- ✓ Utiliser des ventilateurs de déstratification pour mélanger l'air des parties hautes des locaux à plafonds élevés (grands halls, entrepôts, etc.) avec l'air du niveau des occupants et ainsi éviter l'accumulation d'air chaud près des plafonds.

> ☞ *Dans un entrepôt du Nouveau-Brunswick, la température près du plafond était de 35 °C alors que la température près du plancher était de 20 °C.*
>
> ☞ *L'installation de ventilateurs de déstratification afin de réduire les pertes de chaleur par le toit et assurer une température homogène de 20°C dans l'ensemble du volume a permis de réduire les coûts de chauffage de 49 000 $/an, le coût d'installation des ventilateurs étant récupéré en 7 mois.*

- ✓ S'il n'est pas possible de mieux l'utiliser ailleurs sur le site (en production par exemple), récupérer la chaleur dégagée par les compresseurs ou tout autre équipement nécessitant un refroidissement pour le chauffage des locaux en hiver. L'été, s'assurer de diriger cet excès de chaleur vers l'extérieur du bâtiment.
- ✓ Sauf pour des cas particulier, maintenir une pression aussi neutre que possible dans l'édifice : en hiver une pression négative (édifice en dépression) provoque une entrée d'air froid tandis qu'une pression positive (édifice en surpression) laisse échapper de l'air chaud, et vice versa en été.

> ☞ **Quelques repères (retours sur investissements typiques inférieurs à 3 ans) :**
>
> ❶ *Récupérer la chaleur dégagée par un compresseur de 60 kW fonctionnant à pleine charge permet de subvenir aux besoins en eau chaude sanitaire d'une usine de 100 personnes.*
>
> ❷ *Récupérer la chaleur dégagée par un compresseur de 20 kW fonctionnant à pleine charge permet de préchauffer jusqu'à 60 °C l'air de combustion d'une chaudière de 1 MW de puissance (~100 hp).*
>
> ❸ *Récupérer la chaleur dégagée par un compresseur de 50 kW fonctionnant à pleine charge permet de préchauffer jusqu'à 80 °C l'eau d'appoint d'une chaudière de 1 MW (~100 hp) de puissance produisant de la vapeur (base : 60% de retour de condensats).*
>
> *Note : données typiques variant en fonction de la charge du compresseur et de son taux d'utilisation mais également du secteur industriel et de l'usine ainsi que du type de chaudière et du combustible, du matériel de production d'eau chaude, etc*

- ✓ Limiter au minimum les échanges entre les zones froides et les zones chaudes : l'installation de portes à ouverture automatique rapide ou de rideaux de plastique entre un entrepôt froid et un lieu de travail chaud permet à la fois des économies en chauffage et en réfrigération.
- ✓ Évaluer l'isolation des murs et plafonds. L'isolation d'un mur intérieur peut aussi être intéressant s'il fait la séparation entre une zone chaude et un entrepôt froid.
- ✓ Pour les débarcadères et les entrepôts, considérer un mode de chauffage par rayonnement infrarouge : il permet de réchauffer le personnel présent et non l'air du local qui s'échappe lors de l'ouverture des portes.

Des équipements de CVC à rénover ? Ayez le réflexe éconergétique.

La rénovation complète d'un système de CVC est une opération lourde qui demande une analyse approfondie effectuée par des spécialistes et dont les coûts sont importants. Parmi les actions les plus simples on peut citer :

- ✓ Installer des systèmes pour récupérer la chaleur de l'air évacué et préchauffer l'air d'appoint.
- ✓ Réduire le débit d'air neuf en déplaçant l'air des espaces demandant un environnement de plus grande qualité vers les espaces où une qualité d'air moindre est acceptable.
- ✓ Étudier la possibilité d'installer des systèmes de traitement d'air pour permettre le recyclage de tout ou d'une partie de l'air.

> ☞ *Un bâtiment de l'Ontario prélevait à longueur d'année 12 m^3/s d'air extérieur pour le conditionner à 20 °C et 50% d'humidité relative.*
>
> ☞ *L'installation d'un récupérateur de chaleur à boucle de glycol pour préchauffer l'air d'alimentation à partir de l'air extrait a permis de réaliser une économie nette de 26 000 $/an, le coût d'installation du système au glycol étant amorti en 18 mois.*

D.5. Réfrigération et refroidissement

La réfrigération est utilisée pour la production de froid nécessaire à certains traitements ou procédés de fabrication ainsi que pour le refroidissement, la congélation et la surgélation de certains produits pour leur conservation. Elle est également utilisée pour le refroidissement de l'air dans la climatisation des bâtiments.

> ☞ *Très peu d'opérateurs sur les sites de production sont formés à la conduite des installations de réfrigération ;*
>
> ☞ *La plupart des équipements de réfrigération en activité sont surdimensionnés.*

Le secteur agroalimentaire consomme à lui seul environ 40% de l'ensemble des besoins en réfrigération de tout le secteur industriel canadien. Les équipements de production de froid y sont en général responsables de 25% à 35% de la consommation électrique et même plus dans certains cas particuliers.

Pourtant, les systèmes de réfrigération utilisés offrent un potentiel d'efficacité énergétique encore largement inexploité et des réductions significatives de la consommation électrique peuvent être obtenues:

❶ **Jusqu'à 30%** à l'aide de mesures peu coûteuses (*retour sur investissement inférieur à 12 mois*), généralement très simples, relevant de l'entretien préventif et de bonnes pratiques d'opération, au niveau des centrales de réfrigération, des locaux réfrigérés et du réseau de distribution de froid.

❷ **Potentiel additionnel** par des améliorations éconergétiques des équipements actuels (*retour sur investissement généralement inférieur à trois ans*) comme le délestage de charge, le stockage thermique ou la récupération de chaleur au niveau des compresseurs. Il est également possible d'implanter de nouveaux équipements plus performants, conçus et exploités dans une vision plus globale de gestion énergétique des bâtiments (*retour sur investissement de trois ans et plus*).

Refroidir juste ce qui est nécessaire et minimiser la charge de réfrigération

> ☞ **Dans une chambre froide, les sources de chaleur parasites peuvent être plus importantes que la charge à réfrigérer. Quelques repères :**
>
> ❶ *Le renouvellement d'air par les ouvertures peut représenter à lui seul 30% de cette chaleur parasite ;*
>
> ❷ *Le gain thermique par les murs, le plafond et le sol 20% ;*
>
> ❸ *La présence de personnel et son activité 10% ;*
>
> ❹ *L'échauffement des ventilateurs des évaporateurs 15% ;*
>
> ❺ *La chaleur dégagée par le système d'éclairage 10% ;*
>
> ❻ *Le système de dégivrage des évaporateurs jusqu'à 15% dépendamment de la méthode et du type de contrôle utilisé.*

✓ Certains produits conservés en chambre froide n'ont peut-être pas besoin d'être réfrigérés.

Vérifier si la température d'un espace climatisé pourrait suffire à certains besoins de refroidissement

- ✓ Transporter le plus rapidement possible les produits déjà froids dans la zone réfrigérée et laisser les produits chauds refroidir avant réfrigération.

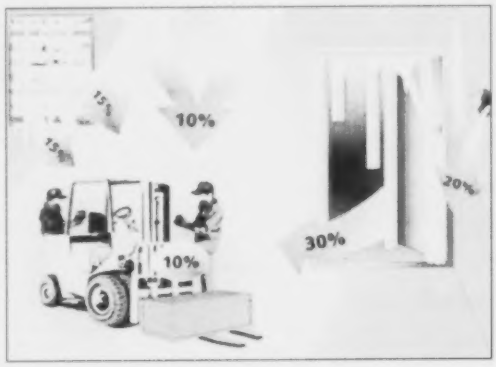
  Les produits livrés par camion frigorifique devraient être placés immédiatement dans la zone réfrigérée tandis que les produits chauds sortant des lignes de production devraient préalablement refroidir à température ambiante si la qualité ne risque pas d'être affectée.

- ✓ Fermer le plus rapidement possible les portes des chambres réfrigérées afin de ne pas laisser l'air chaud y entrer inutilement.

- ✓ Limiter au minimum la présence des employés dans les espaces réfrigérés ainsi que l'utilisation de moyens de manutention dégageant de la chaleur tels que les chariots élévateurs.

- ✓ S'assurer du bon état de l'isolation de la chambre froide et des joints d'étanchéité.

  Pour une chambre froide à -18°C, située dans un environnement à +18°C, une isolation de 200 mm de mousse de polyuréthanne au lieu des 150 mm usuels permet de réduire de 5% l'apport de chaleur parasite total de la chambre.



- ✓ Les ventilateurs des évaporateurs, lorsqu'ils sont directement dans l'espace réfrigéré, ont un double coût en électricité : en premier lieu pour leur fonctionnement, puis pour compenser en réfrigération la chaleur dégagée par leurs moteurs.

  En fonction de la charge à réfrigérer, réduire la puissance des moteurs peut être avantageux : même si le transfert de chaleur est moindre à l'évaporateur, ils dégagent moins de chaleur ce qui peut compenser l'inconvénient précédent.

  Envisager la possibilité d'installer des ventilateurs de plus grands diamètres fonctionnant à plus basse vitesse : ils s'échauffent moins et sont plus silencieux. Pour un même débit, un ventilateur de 1 000 mm peut dégager 60% moins d'énergie qu'un ventilateur de 750 mm.

  Dans de très nombreux cas, les ventilateurs d'évaporateurs fonctionnent en permanence. Étudier la possibilité d'en arrêter un ou plusieurs en fonction des besoins en réfrigération.

- ✓ Utiliser un éclairage à haute efficacité énergétique et qui s'arrête lorsqu'il n'est pas requis (minuterie, détecteurs de présence).

  Comme les ventilateurs des évaporateurs, l'éclairage participe 2 fois aux coûts en électricité : d'abord pour son propre fonctionnement puis en réfrigération pour évacuer la chaleur dégagée par les lampes.

> ☞ **L'installation de rideaux à lames de plastique en chiffres :**
>
> **Avant** : *suite à l'ouverture de la porte d'un congélateur, l'air intérieur perdait 17°C passant de -19°C à -2°C et le système de réfrigération fonctionnait pendant 12 min pour revenir à -19°C.*
>
> **Après** : *par l'installation de rideaux à lames de plastique, la variation de température a été limitée à 3°C, réduisant ainsi le temps de fonctionnement du compresseur à 3 min.*

- ✓ Installer des rideaux à lames de plastique ou des portes à ouverture et fermeture automatiques rapides pour réduire au minimum les échanges d'air entre les espaces réfrigérés et ceux qui ne le sont pas.

- ✓ Veiller à la qualité de l'isolation sur l'ensemble du réseau de distribution de froid : isoler la tuyauterie, les raccords et les valves qui ne le sont pas et remplacer les isolants en mauvais état.

✓ La température de l'espace réfrigéré ne devrait pas être plus basse que nécessaire.

Les marges de sécurité sont fréquentes et elles coûtent cher : toute augmentation de la température de 1°C peut réduire la consommation énergétique de 2%.

Produire du froid de façon efficace

✓ S'assurer que la température du condenseur est la plus basse possible.

Toute augmentation de la température de 1°C augmente la consommation énergétique de 2%.

✓ Maximiser la surface d'évaporation pour une plus grande efficacité du système.

✓ Vérifier régulièrement l'état de propreté des évaporateurs et les nettoyer si nécessaire.

Un évaporateur encrassé perd en efficacité de transfert : l'équipement de réfrigération fonctionne alors plus longtemps et consomme davantage d'énergie.

✓ Éviter d'exposer au soleil un condenseur refroidi à l'air et s'assurer que l'air circule librement et sans contrainte.

✓ Vérifier régulièrement l'état de propreté des condenseurs, y compris les tours de refroidissement, et les nettoyer si nécessaire.

Comme tout échangeur de chaleur, un condenseur encrassé perd en efficacité : l'équipement de réfrigération est alors davantage sollicité et consomme plus d'énergie.

☞ **Des traces persistantes de givre ou de glace dans votre installation ? Autant de sources d'inefficacité.**

✓ Dans la mesure du possible, bannir toute utilisation d'eau dans les espaces réfrigérés ;

✓ S'assurer que le dégivrage de l'évaporateur est correctement réglé de sorte que le cycle cesse dès que toute la glace a fondu. Revoir le réglage à intervalles de temps réguliers pour tenir compte des changements de température ambiante ;

✓ Vérifier la position du thermostat (sonde de régulation de la chambre froide) : celui-ci ne doit pas être trop près de la porte ni de l'évaporateur ;

✓ S'assurer que le dégivrage ne fonctionne que lorsque cela est nécessaire ;

✓ Vérifier l'état des drains pour l'eau de dégivrage (possibilité d'obstruction) et les éléments chauffants.

✓ Sur l'utilisation des compresseurs, le lecteur pourra se reporter à la partie traitant de l'air comprimé en plus des recommandations suivantes :

♦ Établir un plan de maintenance des compresseurs : dans l'industrie agroalimentaire, on retrouve de nombreux équipements de réfrigération âgés de 10 ans et plus, souvent en mauvais état.

En particulier, contrôler et si besoin remplacer les valves et les roulements à billes.

♦ Vérifier si le compresseur est adapté à la demande de réfrigération.

Un compresseur trop gros ne fonctionne pas à pleine charge, présente une moindre efficacité et provoque des pointes d'appel de puissance lors des phases de démarrage, alors qu'un compresseur trop petit fonctionnant en permanence brisera prématurément.

♦ Établir le profil de charge de réfrigération de l'installation et utiliser les compresseurs ayant la meilleure efficacité si l'usine possède plusieurs compresseurs.

♦ Utiliser le profil de charge pour comparer la possibilité d'installer un seul gros compresseur ou plusieurs plus petits lorsqu'un compresseur doit être changé.

♦ Privilégier un compresseur à vis pour satisfaire une demande quasi constante : *ce type de compresseur est très fiable même à charge partielle.*

✓ Qu'elle soit dégagée au compresseur ou au condenseur, une bonne partie de l'énergie nécessaire à la production de froid est aisément récupérable sous forme de chaleur pour chauffer des locaux ou réaliser du stockage thermique pour la production d'eau chaude sanitaire ou de procédés.

Combattre les fuites de réfrigérant : elles sont source d'inefficacité, de coûts supplémentaires importants… et sont dommageables pour l'environnement

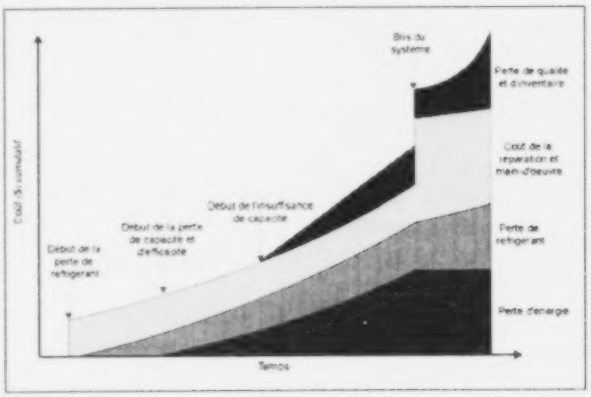
✓ Estimer les coûts que peut engendrer la défaillance complète du système de réfrigération.

✓ Faire prendre conscience aux personnes concernées de l'impact potentiel d'une fuite qui dégénère, aussi minime soit-elle :

♦ Coûts d'opération plus élevés liés à une perte rapide d'efficacité ;

♦ Bris du système, arrêt de la production de froid et perte des réserves, particulièrement aux périodes chaudes de l'année ;

♦ Frais de services élevés.



✓ Mettre en place un plan de maintenance préventive de détection de fuites.
Vérification régulière de la présence de bulles dans le réfrigérant liquide (la présence de bulles signifie un manque de réfrigérant).

✓ Combler rapidement tout manque de réfrigérant et rechercher les fuites à l'aide d'un détecteur de fuite.

✓ Utiliser le plus possible des boucles de fluides secondaires : elles limitent la circulation du réfrigérant dans l'usine et la quantité nécessaire au fonctionnement des équipements de réfrigération.

Les fuites en quelques repères :

✓ *En cas de fuite, 1 kg de R22 a le même impact sur le réchauffement de la planète que 1 500 kg de CO_2 ;*

✓ *Les systèmes centralisés de réfrigération présentent un taux de fuite annuel moyen de 8% pouvant baisser jusqu'à 2% dans les installations récentes utilisant les meilleures techniques, composants et matériaux ;*

✓ *Le manque de réfrigérant dégrade rapidement les performances d'un équipement de réfrigération : ainsi, une charge de réfrigérant réduite de 15% par rapport à sa valeur nominale peut typiquement provoquer une chute de performances de 30 à 40% ;*

✓ *Les principales sources de fuites de réfrigérant sont les raccords-unions responsables de plus de 50% de toutes les fuites et dont on doit éviter l'utilisation, les étanchéités aux arbres d'entraînement, les autres types de raccords mécaniques et joints d'étanchéité, les lignes et capillaires utilisés pour le contrôle, les robinets, valves et soupapes et les vibrations au niveau des arbres d'entraînement.*

Des équipements de réfrigération à rénover ? Adopter une approche intégrée alliant récupération de chaleur et efficacité énergétique

La rénovation d'une installation de réfrigération est une opération lourde que l'on réalise généralement en fin de durée de vie des équipements (10 à 20 ans), à l'occasion d'une augmentation importante de production ou pour éliminer l'utilisation d'un réfrigérant interdit. Bien que l'installation des technologies les plus récentes nécessite de consulter des spécialistes et implique des coûts généralement supérieurs, les retombées sont très importantes à moyens termes.

Parmi les mesures d'efficacité énergétique et de services les plus performantes, on peut citer :

- ✓ La récupération de la chaleur dégagée au condenseur, au désurchauffeur et au compresseur pour chauffer les locaux l'hiver ou produire de l'eau chaude tout au long de l'année.
- ✓ Le remplacement des systèmes de réfrigération à pression constante par des systèmes à pression de condensation variable (tête flottante).
- ✓ L'utilisation de compresseurs semi-hermétiques plus étanches et réduisant le taux de fuite de manière très significative.
- ✓ Le contrôle centralisé des demandes en énergie pour favoriser l'écrêtement des pointes de la demande en électricité.
- ✓ Le stockage thermique (chaud et froid) pour profiter également des périodes à tarifications électriques intéressantes (nuits et fins de semaine).
- ✓ Là où cela s'applique, l'utilisation accrue du froid extérieur en hiver (bancs de neige) pour le pré-refroidissement du réfrigérant.
- ✓ Le refroidissement par absorption si un excès de chaleur est disponible sur le site : il est alors possible de produire du froid sans consommer d'énergie électrique.

> ☞ **Lors de la rénovation d'un entrepôt frigorifique de 6 500 m² opérant à –26°C**, *on a pu réduire les coûts énergétiques liés à la réfrigération de 31%, abaisser la demande de puissance de 188 kW, diminuer la consommation électrique liée à l'éclairage de 84 MWh et abaisser la charge thermique associée de 25 MWh pour une luminosité accrue d'un facteur 2,5 à l'aide des mesures suivantes :*
>
> ✓ *Passage d'un système au Fréon à un système à l'ammoniac et remplacement des 7 compresseurs réciproques (625 hp au total) par 4 compresseurs à vis totalisant 400 hp ;*
>
> ✓ *Installation d'un condenseur évaporatif (tour de refroidissement) plus efficace et diverses mesures de récupération d'énergie ;*
>
> ✓ *Remplacement de 140 lampes à vapeur de mercure par 67 lampes à vapeur de sodium haute pression.*

D.6. Production et distribution de vapeur

L'eau chaude et la vapeur sont très largement utilisées comme source de chaleur dans la plupart des procédés de fabrication ou de traitement, le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire, la cogénération et même certains équipements de réfrigération. Notons que dans les industries de taille grande ou moyenne, ces deux sources de chaleur sont souvent associées, l'eau chaude étant générée à partir de la vapeur au moyen d'échangeurs de chaleur.

Les coûts énergétiques associés représentent une part importante de la facture énergétique de la plupart des sites de fabrication. Dans l'industrie agroalimentaire canadienne, où l'on retrouve quelques 3 000 chaudières âgées en moyenne d'une vingtaine d'années, la production de vapeur représente fréquemment de 40% à 50% des besoins énergétiques et même jusqu'à 60% voire 70% dans certains cas particuliers. Malgré son importance, aussi bien au niveau des opérations que sur le plan économique, la vapeur est encore souvent considérée comme une ressource continue et pratique dont on ne se soucie guère d'optimiser la production et l'utilisation.

Pourtant, des réductions significatives de la consommation énergétique peuvent être obtenues assez facilement tant au niveau de la production de la vapeur qu'au niveau de son réseau de distribution :

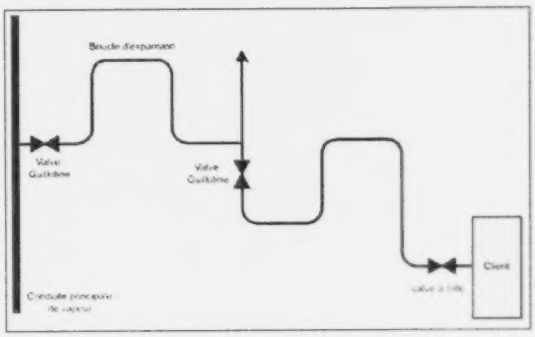
- ❶ **5% à 20%** au niveau des équipements de production en optimisant les paramètres de fonctionnement des chaudières, en suivant un programme d'entretien régulier (*retour sur investissement inférieur à 12 mois*) ou en récupérant une partie de l'énergie perdue par les fumées (*retour sur investissement inférieur à 3 ans*).

> ☞ Le coût d'achat d'une chaudière industrielle représente **moins de la moitié** du coût annuel du combustible consommée par cette chaudière.
>
> ☞ 1 chaudière sur 3 est mal réglée.
>
> ☞ 75% à 80% est une efficacité thermique reconnue comme raisonnablement accessible pour la production de vapeur à l'aide d'une chaudière à vapeur récente et bien entretenue.

- ❷ **5 à 15%** au niveau du réseau de distribution de vapeur en alliant maintenance préventive, respect de bonnes pratiques et mesures éconergétiques (*retour sur investissement variant de quelques mois à 3 ans).*

Connaître et entretenir son réseau de vapeur est payant… le négliger s'avère coûteux

- ✓ Établir un diagramme d'écoulement du réseau de vapeur dans l'usine ("flowsheet") : il vous permettra de mieux connaître votre système de distribution ainsi que les principaux postes utilisateurs.
- ✓ Démanteler les parties du réseau qui ne servent plus : elles nuisent à la compréhension du réseau et peuvent être le siège de pertes thermiques et de fuites de vapeur inutiles.



- ✓ Installer des valves pour isoler les sections du réseau de distribution qui ne sont pas utilisées pendant de longues périodes.
- ✓ Utiliser des valves de bonnes grosseurs. Une plus grande quantité de chaleur se dégage de la surface d'une grosse valve et il en coûte plus cher pour les isoler alors qu'une valve trop petite provoque une plus grande perte de pression.

- ✓ Diminuer le plus possible le nombre de coudes, raccords en "T" et autres changements brusques de direction ou dimension : *ces éléments favorisent la condensation et la perte d'efficacité.*

Longueur équivalente des accessoires du réseau précédent

Accessoire	Longueur* équivalente (m)	Nombre	Longueur équivalente (m)
Coude	3.0	9	27.0
Raccord en "T"	6.0	1	6.0
Valve à bille	34.0	1	34.0
Valve Guillotine	1.3	2	2.6
Total			**69.6**

* : longueur du tuyau présentant les mêmes caractéristiques que l'accessoire

- ✓ Combattre les fuites : elles sont une source d'inefficacité et représentent un coût important.

  Sur un réseau de distribution complexe et mal entretenu, les fuites peuvent représenter jusqu'à 30% de la vapeur produite aux chaudières.

- ✓ Mettre en place un plan de mesures préventives de détection de fuites. Celui-ci peut se faire par inspection, variation de pression sur une section isolée du réseau, etc. En particulier, vérifier l'état des joints, des raccords et des brides et inscrire les fuites dans un livre de maintenance pour faire un suivi des réparations.
- ✓ Veiller à la qualité de l'isolation sur l'ensemble du réseau : isoler les tuyaux, raccords et valves qui ne le sont pas et remplacer les isolants en mauvais état.
  L'isolation d'un réseau de vapeur peut réduire la consommation énergétique de 3% à 13%.

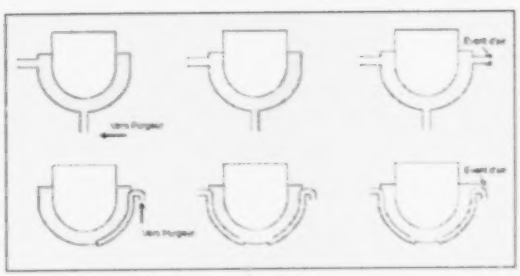
Un réseau et des équipements bien conçus et en bon état pour une distribution efficace

- ✓ S'assurer que le réseau présente une pente suffisante pour faciliter l'écoulement des condensats.

  La tuyauterie d'un réseau de vapeur devrait présenter une inclinaison typique de 125 mm par 30 m.

- ✓ Utiliser des changements de diamètres excentriques afin de permettre aux condensats de s'écouler librement : l'accumulation d'eau dans les tuyaux peut poser certains problèmes de corrosion, de pertes de charges, de coups de bélier, etc.

- ✓ Vérifier le bon positionnement des purgeurs d'air et de condensat ("steam trap") sur les échangeurs de chaleur. L'air s'accumule et reste souvent emprisonné dans les parties supérieures des échangeurs de chaleur de type "tubes et calandre" qui utilise la vapeur du côté calandre, réduisant parfois de façon significative leur efficacité.



✓ Vérifier le bon fonctionnement des purgeurs à vapeur sur le réseau de vapeur. Pour les réseaux à moins de 30 psig, une inspection par an est suffisante, mais pour les réseaux entre 30 et 100 psig, une inspection tous les 6 mois est préférable. *Des économies substantielles de 5% à 15% y sont souvent associées.*

> ☞ **Contrôler ses purgeurs à vapeur est payant** : *sur un réseau de vapeur à 150 psig, un purgeur de 1/8 de pouce défectueux peut laisser échapper 34 kg de vapeur par heure et il n'est pas rare que 10% des purgeurs d'un réseau manquant d'entretien soient défectueux. Ainsi, dans une usine où le coût de la vapeur est de 10$/tonne, la mise en place d'un programme d'inspection et d'entretien d'un tel réseau comportant 150 purgeurs permet d'économiser 45 000 $/an.*

✓ Récupérer le plus de condensats possible… ils contiennent une quantité d'énergie intéressante que la chaudière a déjà fournie.
Chauffer de l'eau froide d'appoint au lieu d'utiliser les retours de condensats pour produire de la vapeur demande 15% à 18% d'énergie en plus pour produire une même quantité de vapeur.

✓ Récupérer l'énergie des purges de vapeur ("flash") à basse pression pour les injecter dans un condensat plus froid ou pour réchauffer un liquide à plus basse température à l'aide d'un échangeur.

Produire la chaleur efficacement et de façon optimale

✓ Identifier l'utilisation qui requiert la pression la plus élevée. Abaisser la pression de la vapeur produite par la chaudière au niveau nécessaire pour satisfaire la demande et compenser les pertes de pression du réseau de distribution.

✓ Vérifier si la plus haute pression demandée ne peut pas être abaissée par de simples modifications d'équipement ou de procédés.

✓ Établir le profil de charge de la demande et les variations de régimes des chaudières. Si l'usine en possède plusieurs, mettre en place une stratégie d'opération permettant d'arrêter l'une d'entre elles lors des périodes à demande réduite, comme la nuit ou la fin de semaine.
Une chaudière standard atteint souvent, son meilleur rendement lorsqu'elle fonctionne entre 60% et 100% de sa capacité. Cette caractéristique dépend toutefois de la chaudière et de son type.

✓ Installer des équipements de production de vapeur adaptés aux besoins : une seule grosse chaudière pour répondre à l'ensemble de la demande n'est pas nécessairement la meilleure solution.
Afin de répondre à une demande fluctuante, une grosse chaudière fonctionnera souvent à bas régime et ne fournira pas son meilleur rendement. Il peut être préférable d'utiliser une chaudière de plus faible capacité pour fournir une base constante, assistée d'une autre chaudière ou d'un générateur de vapeur pour absorber les pointes. Cette solution permet alors à la chaudière de fonctionner à son maximum d'efficacité.

✓ Mettre en place des registres (ou volets d'isolement) sur le circuit des gaz de combustion lorsque la chaudière fonctionne à très bas régime ou n'est pas utilisée.
En limitant ainsi les pertes par la cheminée et le refroidissement du corps de la chaudière, la consommation de combustible peut être réduite de 1%.

✓ Contrôler régulièrement la qualité de la combustion (teneurs en O2 et CO dans les gaz de combustion) à l'aide d'un analyseur de gaz afin de rester

Type de carburant	Excès d'air (%)		Teneur en O2 dans les fumées (%)	
	Min	Max	Min	Max
Gaz naturel	10	15	2.0	2.7
Huile légère (n°2)	12.5	20	2.3	3.5
Huile lourde (n°6)	20	25	3.3	4.2
Charbon	30	50	4.9	7.0

dans les conditions optimales de fonctionnement de la chaudière.

Note : les services d'une firme spécialisée sont normalement requis pour ce type d'analyse.

Un excès d'air trop important conduit le brûleur à chauffer inutilement de l'air qui ne participe pas à la combustion et augmente les pertes par la cheminée, tandis qu'un excès d'air trop faible conduit à une combustion incomplète, dommageable pour l'environnement, à moindre rendement énergétique et encrassant rapidement les échangeurs côté fumées.

Lorsque l'excès d'air est supérieur à sa valeur optimale, toute réduction de 2% de la teneur en O_2 dans les gaz de combustion d'une chaudière permet de réduire sa consommation énergétique de 1,2%.

Note: Le réglage d'un brûleur doit être réalisé par du personnel compétent, qualifié et autorisé. Tout brûleur mal réglé est énergivore, polluant et potentiellement dangereux.

☞ **Il existe 3 sources principales de pertes sur une chaudière** : *les pertes par les fumées représentant généralement 75% du total des pertes, le reste étant également réparti entre les pertes par rayonnement des parois de la chaudière et les pertes dues aux purges de la chaudière ("blowdown").*

✓ Récupérer l'énergie contenue dans les gaz de combustion à l'aide d'échangeurs à contact direct ou indirect pour produire de l'eau chaude, préchauffer l'eau d'appoint ou, dans le cas des grosses chaudières, préchauffer l'air de combustion. *Un échangeur à contact indirect ("flue gas economiser") permet d'augmenter l'efficacité d'une chaudière de 3% à 5% alors qu'un échangeur à contact direct ("direct contact economiser") permet d'accroître l'efficacité d'une chaudière de 10% à 20%.*

Note: les gaz de combustion d'une chaudière fonctionnant à l'huile contiennent des composés soufrés (SO_X) qui produisent de l'acide au contact de l'eau liquide ou lorsque la température des gaz de combustion devient inférieure au point de rosée acide des gaz. Dans ce cas, il faut s'assurer de prendre certaines précautions particulières (technologiques ou opératoires) pour éviter la corrosion de la cheminée et du système de récupération d'énergie. Les échangeurs à contact direct ne peuvent normalement pas être utilisés dans ce cas.

☞ **Récupération d'énergie dans les gaz de combustion :**

Dans un établissement situé à Montréal, le remplacement de 2 chaudières à vapeur au gaz (âgées de 25 ans) par 2 nouvelles chaudières de 20 000 lb/h (125 psig) dont les cheminées se rejoignent pour alimenter un système de récupération d'énergie à contact direct a permis de :

❶ *Réduire la consommation énergétique de la chaufferie de 600 000 m^3/an (180 000 $/an, à 0,30 $/$m^3$) et les émissions de CO_2 de 1 200 t/an;*

❷ *Produire de l'eau chaude utilisée pour divers usages dans l'établissement en réduisant la température des fumées de 230 °C à 50 °C tout en satisfaisant les besoins en vapeur;*

❸ *Fiabiliser et simplifier la conduite de la chaufferie.*

✓ Utiliser un air de combustion préchauffé dans la limite admissible par la chaudière. En particulier, vérifier la température d'air maximale acceptée par le réfractaire et le brûleur installés.

☞ **Quelques repères :**

❶ *Prélever l'air de combustion au-dessus de la chaudière ou en partie haute de la chaufferie conduit à des gains typiques de 1%.*

❷ *Prélever l'air de combustion autour de l'enveloppe de la chaudière conduit à des gains typiques de 2%.*

❸ *Préchauffer l'air de combustion à l'aide des gaz de cheminée (échangeur air / fumées) conduit à des gains typiques de 3 à 8%. Cette mesure est surtout rentable que les grosses chaudières.*

Toute augmentation de 20 °C de la température de l'air de combustion d'une chaudière permet de réduire sa consommation énergétique de 1%.

- ✓ Les purges de chaudières ("blowdown") sont constituées d'eau très chaude qui peut être utilisée pour préchauffer de l'eau ou un autre liquide.
  Récupérer l'énergie contenue dans les purges d'une chaudière permet de réduire de 1 à 4% sa consommation de combustible.

- ✓ Vérifier le bon fonctionnement du système de traitement de l'eau d'alimentation de la chaudière : il limite les risques de corrosion, l'encrassement des échangeurs côté eau et minimise les purges de chaudière.

☞ **Quelques repères :**
Contrôler la qualité de la combustion et récupérer une partie des pertes permet d'augmenter l'efficacité d'une chaudière de 1% environ pour :

❶ *Chaque diminution de l'excès d'air de 15%, ou*

❷ *Chaque réduction de la teneur en O_2 de 1,6% dans les gaz de combustion, ou*

❸ *Chaque réduction de la température des fumées de 16°C (pour une chaudière au gaz).*

L'encrassement limite le transfert de chaleur et peut réduire l'efficacité d'une chaudière jusqu'à 12%.

- ✓ Vérifier la possibilité d'installer un chauffe-eau à contact direct si, après avoir récupéré toute la chaleur disponible dans l'usine, les besoins d'eau chaude ne sont pas comblés.
  Un chauffe-eau à contact direct peut atteindre une efficacité de 99,7%, tandis que les chaudières conventionnelles conduisent à des efficacités moindres surtout si l'eau chaude est produite à l'aide de vapeur.

D.7. Gestion de l'eau

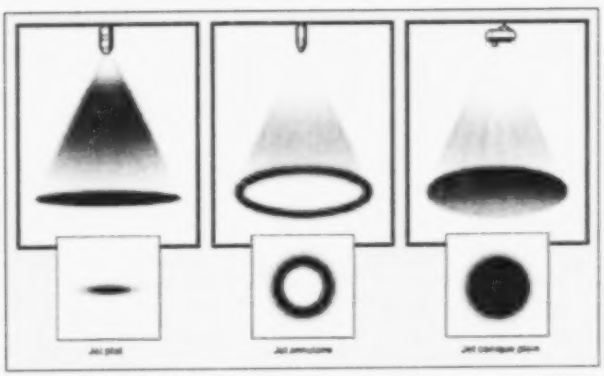
Le secteur agroalimentaire canadien est un grand consommateur d'eau, et ce, pour différentes raisons. À l'exception de l'industrie des boissons, où elle entre directement dans la fabrication du produit final, l'eau est essentiellement utilisée comme agent de chauffage ou de refroidissement mais aussi pour le nettoyage des équipements. En effet, l'une des caractéristiques de l'industrie agroalimentaire est de nécessiter une parfaite maîtrise des conditions sanitaires. Ainsi, de fréquentes opérations de rinçage et de nettoyage, aussi bien de la matière transformée que des équipements et du sol, sont réalisées souvent au moyen d'eau chaude (40 à 60°C, parfois plus).

Les activités du secteur agroalimentaire génèrent des effluents contenant d'importantes quantités de matières organiques (matières grasses, sang, sous-produits divers, etc.) que l'on doit traiter avant d'être rejeté dans l'environnement à l'aide d'un traitement primaire mécanique (tamisage, filtration, décantation, etc.) suivi d'un traitement secondaire biologique destiné à en réduire la demande biochimique en oxygène (DBO). Il est à noter que les coûts associés à ces systèmes de traitement sont de plus en plus importants, sans compter le coût d'achat de l'eau fraîche.

Aussi, pour remplir ces fonctions dans les étapes de fabrication, de rinçage, de nettoyage, etc., l'eau doit subir divers traitements. Ces traitements nécessitent l'utilisation d'énergie, en plus de l'apport thermique pour chauffer l'eau de procédé et de nettoyage.

Toutefois, l'adoption de certaines mesures de gestions de l'eau, pour la plupart très simples à mettre en œuvre, peuvent en réduire la consommation de manière significative.

- ✓ Utiliser des racles en caoutchouc, des pelles ou des balais, mais surtout éviter les jets d'eau pour le balayage des matières solides.
- ✓ Pour un nettoyage optimal, installer le type de buse le mieux adapté au besoin. Par exemple, il est conseillé d'utiliser un jet plat pour le rinçage des carcasses ou des planchers : il permet un bon nettoyage à moindre débit. Les trois principaux types de buse sont représentés ci-dessous.
- ✓ Ne pas laisser les boyaux couler inutilement : installer des systèmes d'arrêt automatique ou des minuteries.



☞ Les buses à jet plat utilisent moins d'eau que les buses à jet conique. Que ce soit pour le lavage de planchers, le nettoyage de carcasses ou le nettoyage de grands réservoirs, le jet plat permet une meilleure maîtrise des opérations.

☞ Par contre, si l'angle d'un jet annulaire est suffisamment grand pour atteindre les parois d'un réservoir de taille plus modeste, celui-ci sera le plus adapté.

- ✓ Commander et contrôler le nettoyage des équipements (notamment la tuyauterie) à l'aide d'une mesure conductimétrique ou optique : celui-ci s'arrêtera automatiquement dès que l'eau de rinçage aura atteint les caractéristiques de propreté requises.
- ✓ Vérifier les réseaux de distribution d'eau et réparer sans tarder les fuites.
- ✓ Si la température de l'effluent provenant du lavage est supérieure à 35°C, récupérer l'énergie qu'il contient en préchauffant l'eau d'alimentation. ***Attention*** *: certains systèmes de traitements secondaires nécessitent une température minimum en dessous de laquelle on veillera à ne pas abaisser la température de l'effluent. De plus, certains effluents peuvent corroder ou colmater certains types d'échangeurs de chaleur.*
- ✓ Réaliser 100% du nettoyage à l'eau chaude est parfois superflu : étudier la possibilité de réaliser un nettoyage préliminaire à l'eau froide et de réaliser seulement le rinçage final à l'eau chaude.
- ✓ Prendre connaissance des dernières technologies de nettoyage : plusieurs systèmes sans eau ont été développés comme les systèmes sous vide pour le convoyage des viscères et du sang ou la technique du "pigging" pour le nettoyage mécanique de réseaux de tuyaux qui offrent en plus la possibilité de réutiliser plus facilement le produit ainsi récupéré.
- ✓ Installer un réservoir permettant d'accumuler l'eau chaude produite en différents points de l'usine (refroidissement des compresseurs, récupération d'énergie aux chaudières, etc.). Si l'usine est déjà équipée de réservoirs d'eau chaude, vérifier que leur taille permet d'absorber les variations du procédé avec le moins de débordements possibles.
- ✓ Si vous devez réduire significativement la DBO des effluents de votre usine à l'aide d'un traitement secondaire, analyser la possibilité d'installer un traitement anaérobique. Ce type de traitement produit du biogaz contenant entre 60 et 70% de méthane qu'il est possible d'utiliser comme combustible pour alimenter une cogénératrice ou des chaudières. *Un tel projet n'est généralement rentable que pour des volumes d'effluents importants dont la charge en DBO est très élevée.* ***Attention*** *: le biogaz ainsi produit doit souvent être traité préalablement à son utilisation allongeant ainsi le retour sur investissement d'un tel projet.*

Réutilisation de l'eau : certaines précautions à prendre

Après la mise en œuvre de solutions techniques telles que celles présentées précédemment, l'une des principales possibilités additionnelles de réduction de la consommation d'eau consiste à recycler et à réutiliser l'eau. Le recyclage de l'eau de procédé nécessite toutefois la mise en place de mesures strictes pour tenir compte de tout danger potentiel pour la santé et la sécurité, notamment en matière de contamination microbienne. Dans les secteurs concernés, de tels systèmes devront préalablement être approuvés par les organismes d'inspection.

E. NOUVELLES TECHNOLOGIES ÉCONERGÉTIQUES APPLICABLES DANS LES PROCÉDÉS DE FABRICATION

E.1. La filtration membranaire

E.2. Pasteurisation et contrôle bactérien à froid

- E.2.1. Traitement par microfiltration et ultrafiltration
- E.2.2. Traitement sous hautes pressions (hyperbare)
- E.2.3. Traitement ultraviolet
- E.2.4. Traitement par effets de champs électriques ou magnétiques
- E.2.5. Traitement par faisceaux d'électrons

E.3. La pompe à chaleur (PAC)

E.4. Recompression mécanique de la vapeur (RMV)

E.5. Nouveaux modes de transfert thermique

- E.5.1. L'infrarouge (IR)
- E.5.2. Les micro-ondes (MO) et les hautes fréquences (HF)
- E.5.3. Le chauffage ohmique
- E.5.4. Le chauffage par induction

E.6. Valves d'homogénéisation à haute efficacité

E.7. Exemples d'applications industrielles

- E.7.1. Industrie des viandes & volailles
- E.7.2. Industrie des boissons
- E.7.3. Industrie de la transformation du lait

Au cours des dernières années, de nombreuses innovations technologiques ont été réalisées pour rendre les procédés de l'industrie des aliments et boissons plus efficaces, moins encombrants, plus sûrs, moins énergivores ou encore plus respectueux de l'environnement.

Plusieurs techniques et procédés de séparation, de traitement thermique, de contrôle bactérien et de récupération d'énergie, d'utilisation récente dans l'agroalimentaire mais reconnus pour utiliser plus efficacement l'énergie que les techniques plus conventionnelles, sont présentés dans cette partie. L'objet du guide étant d'orienter le lecteur vers des solutions utilisables à l'échelle industrielle, nous nous sommes volontairement limités à des techniques éprouvées et disponibles sur le marché.

Ces technologies sont illustrées de réalisations pratiques dans les secteurs des viandes, des boissons et de la transformation du lait démontrant leur efficacité sur le plan énergétique et technico-économique pour l'industrie.

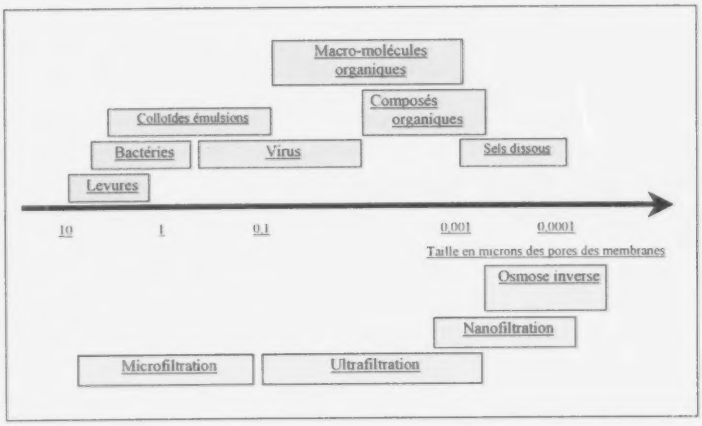
Il est à noter que plusieurs autres techniques, encore actuellement au stade de la recherche et de la mise au point, devraient être mises sur le marché d'ici les cinq prochaines années.

E. Nouvelles Technologies Éconergétiques Applicables dans les Procédés de Fabrication

E.1. La filtration membranaire

La filtration membranaire est utilisée pour séparer des produits présents dans des liquides que les techniques de filtration conventionnelles ne peuvent séparer tels que les protéines, bactéries, virus ou sels dissous. Elle peut également être utilisée pour la concentration, le fractionnement, la purification ou la régénération de liquides en substitution partielle ou totale de procédés classiques de séparation par évaporation ou centrifugation.

Selon l'application, on rencontre dans l'industrie agroalimentaire quatre types de technologies membranaires : microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF) et osmose inverse (OI). La différence entre ces méthodes réside dans leur capacité de séparation liée à la taille des pores des membranes et à la masse moléculaire des composés visés dans le liquide à traiter.



Bien que ces technologies aient été éprouvées dans plusieurs applications industrielles, leur potentiel d'utilisations nouvelles demeure important. Dans bien des cas, elles peuvent remplacer partiellement ou totalement d'autres technologies tout en réduisant la consommation d'énergie.

Principales applications des technologies membranaires dans l'industrie agroalimentaire.

En entrée de procédés	Préparation et contrôle bactérien de l'eau de procédé	Boissons, bière, lait, viandes
	Standardisation du lait	Lait
Au cœur des procédés	Clarification de jus, de boissons, de bière	Boissons, bière, lait, viandes
	Concentration de jus	Boissons
	Élimination de l'alcool	Bière
	Standardisation du lait	Lait
	Pré-concentration du lait	Lait
	Déminéralisation du lactosérum	Lait
	Élimination de micro-organismes et bactéries	Lait, bière, boissons
	Valorisation de protéines	Lait, viandes
En sortie de procédés	Régénération et recyclage (eau et réactifs) des solutions de nettoyage en place (NEP)	Lait, bière, viandes
	Traitement des effluents et recyclage de l'eau et des réactifs	Boissons, bière, lait, viandes

Les principaux avantages des technologies membranaires résident dans :

- ✓ La réduction sensible de la consommation énergétique par rapport aux procédés thermiques conventionnels ;
- ✓ Leur application éprouvée dans plusieurs secteurs industriels, en particulier dans l'industrie laitière ;
- ✓ Les gains environnementaux en permettant le recyclage et en limitant ou supprimant le recours à certains produits chimiques.

E.2. Pasteurisation et contrôle bactérien à froid

La pasteurisation d'un produit alimentaire est le procédé qui consiste à éliminer ou désactiver les micro-organismes qui peuvent en affecter la qualité. Suivant le produit et la technique utilisée, le processus classique consiste à chauffer le produit avant ou après son conditionnement sur un échangeur à plaques ou dans un tunnel de pasteurisation à une température comprise entre 60°C (bière) et 72°C (lait), voire davantage. La pasteurisation à chaud présente toutefois l'inconvénient d'être une grande consommatrice d'énergie et de pouvoir affecter les qualités organoleptiques (principalement le goût) et nutritionnelles du produit.

Afin de contourner ces inconvénients, de nouvelles techniques de traitement à froid, ayant comme dénominateur commun une réduction rapide de la flore microbienne à température modérée, ont été développées au cours des dernières années. De tels procédés trouvent un éventail d'applications dans l'industrie agroalimentaire allant de la pasteurisation des produits à la désinfection et leur mise en œuvre devrait se répandre au Canada à plus ou moins grande échéance. Les plus avancées telles que *les hautes pressions, les ultraviolets, la microfiltration et l'ultrafiltration* ont déjà commencé à se répandre et d'ici quelques années d'autres comme *les faisceaux d'électrons, les champs magnétiques et électriques* prendront de l'importance.

Les principaux avantages des procédés de pasteurisation non thermiques résident dans :

- ✓ La réduction des consommations d'eau et d'énergie ;
- ✓ Le prolongement significatif de la durée de conservation des produits ainsi traités ;
- ✓ L'absence de dégradation liée à la chaleur (goût du produit très proche ou identique à celui du produit non traité, préservation et stabilisation de la teneur en vitamines, etc.).

E.2.1. Traitement par microfiltration et ultrafiltration

La microfiltration et l'ultrafiltration sont des techniques de filtration membranaire permettant, entre autre, la séparation sélective des bactéries. Commercialisée au Canada, elle est déjà utilisée dans **les industries du lait et des boissons** (bière et jus de fruits) aussi bien pour la pasteurisation que pour la clarification des liquides. En fonction du seuil de coupure des membranes en adéquation avec le produit traité, ces deux opérations peuvent même être réalisées simultanément et générer de substantielles économies d'énergie par suppression d'une étape complète de procédé.

↳ **Applications** : *pasteurisation des produits et contrôle bactérien de l'eau.*

E.2.2. Traitement sous hautes pressions (hyperbare)

Le traitement sous hautes pressions consiste à soumettre les produits, emballés ou non, à une très haute pression hydrostatique afin d'éliminer les agents pathogènes et les micro-organismes. A l'heure actuelle, la technologie s'applique aux liquides (jus de fruits) et à certains solides (purées, gelées, charcuteries) et n'est encore très répandue qu'au Japon.

↳ **Applications** : *dans le secteur des jus de fruits, le traitement permettrait de préserver toutes les qualités du jus frais durant 1 mois environ.*
Le procédé présente un potentiel intéressant pour le lait de consommation et le fromage. Sa mise au point se poursuit toutefois pour contrôler son action sur les enzymes naturelles du lait et sur la texture du produit fini.

↳ **Potentiel** : *l'utilisation des hautes pressions autorise le développement de produits ayant des caractéristiques uniques au niveau de la texture, de l'aspect et du goût. Elle augmente également les performances de certains procédés de fabrication notamment dans le domaine de la pénétration de solutés dans les produits, de la congélation et de la décongélation en réduisant considérablement l'exsudation.*

E.2.3. Traitement ultraviolet

Aux États-Unis, la *Food and Drug Administration* (FDA) a récemment approuvé le traitement ultraviolet (UV) comme alternative à la **pasteurisation thermique des jus**. L'utilisation s'avère intéressante pour les producteurs de jus de pomme qui n'avaient pas les infrastructures pour traiter thermiquement de faibles volumes de production. La technologie est aussi approuvée pour d'autres jus frais et reconstitués.

↳ **Applications** : *pasteurisation de jus, du lactosérum (UV hautes densités), contrôle bactérien de l'eau.*

↳ **Limites** : *la technologie UV s'applique essentiellement aux liquides présentant une bonne transmittance. Elle ne peut donc être utilisée pour le traitement du lait dont la flaveur peut être affectée.*

Le traitement UV du lactosérum nécessite le recours à de fortes densités de puissance UV alors que de faibles densités de puissance UV suffisent à la désinfection de l'eau.

E.2.4. Traitement par effets de champs électriques ou magnétiques

Les dernières avancées technologiques dans le domaine des champs électriques et des champs magnétiques (généralement pulsés) ont démontré que ces techniques permettent de désactiver les micro-organismes et la flore microbienne laissant ainsi entrevoir un potentiel intéressant dans l'industrie agroalimentaire.

↳ **Applications** : *pasteurisation de nombreux produits aussi bien liquides que solides (produits carnés, fromages, gâteaux, fruits et légumes, produits à base d'œufs, purées, sauces, lait, jus, sirops), décontamination en emballages opaques.*

↳ **Limites** : *bien que leurs progrès soient rapides et leur intérêt évident, ces procédés n'en sont qu'à leurs débuts (phase de développement et de mise au point).*

E.2.5. Traitement par faisceaux d'électrons

Aux États-Unis, la *Food and Drug Administration* (FDA) a récemment approuvé l'utilisation des rayonnements gamma (émis par une source au cobalt-60 ou au cesium-137), des rayons X d'énergie inférieure à 5 MeV (millions d'électronvolts) et des faisceaux d'électrons d'énergie inférieure à 10 MeV.

Utilisée depuis plus de 40 ans pour la stérilisation du matériel médical, la technologie des faisceaux d'électrons a connu d'importants progrès au cours des dernières années élargissant ainsi son potentiel à la stérilisation et la pasteurisation d'une large gamme de produits agroalimentaires. Elle est ainsi perçue comme la plus prometteuse des technologies de pasteurisation par rayonnements ionisants.

↳ **Applications** : *traitement des viandes, des produits laitiers et des produits alimentaires emballés.*

↳ **Limites** : *la principale barrière à laquelle doit faire face la technologie réside dans l'image qu'a le grand public des produits alimentaires traités par rayonnements ionisants.*

E.3. La pompe à chaleur (PAC)

La notion de PAC fait ici référence aux systèmes "fermés" qui utilisent un fluide intermédiaire appelé réfrigérant. On retrouve les systèmes "ouverts" dans les technologies de RMV (Recompression Mécanique de la Vapeur) qui sont abordées au paragraphe suivant.
La pompe à chaleur est un appareil frigorifique à compression dont le but est de transférer de la chaleur à des fins de chauffage et non de refroidissement. Elle consiste à récupérer de l'énergie thermique de bas niveau de température (source froide) pour la porter à un niveau de température supérieur dans un dissipateur thermique.
Dans l'évaporateur, la source de chaleur à basse température transfère l'énergie vers le réfrigérant qui se vaporise. Le compresseur augmente alors sa température et sa pression tout en le maintenant à l'état vapeur. Dans le condenseur, le réfrigérant transfère l'énergie accumulée vers le dissipateur thermique. À la sortie du condenseur, une vanne de détente réduit la pression du réfrigérant. Le liquide basse pression retourne alors à l'évaporateur pour suivre un nouveau cycle.

↳ **Applications** : *industries des viandes, des produits laitiers et des boissons ayant besoin d'énergie thermique et de froid. Procédés d'évaporation et de concentration.*

↳ **Potentiel** : *les PAC sont généralement utilisées pour réfrigérer et climatiser mais leur attrait pour le secteur agroalimentaire réside également dans leur potentiel pour augmenter la température d'un fluide auquel il manque quelques degrés pour être utilisable.*

↳ **Limites** : *la méconnaissance de la technologie et le retour sur investissement généralement supérieur à 2 ans sont les principales limites à l'utilisation de la pompe à chaleur au niveau industriel.*

E.4. Recompression mécanique de la vapeur (RMV)

La recompression mécanique de la vapeur (RMV) est une technologie de la famille des pompes à chaleur (systèmes "ouvert") particulièrement bien adaptée aux procédés d'évaporation. Elle permet de récupérer la chaleur latente contenue dans la vapeur d'eau souvent perdue dans l'environnement dans les procédés classiques. La vapeur générée par l'évaporation est récupérée par un compresseur qui en augmente la pression et la température (quelques degrés au-dessus du point d'ébullition du liquide).

Une fois la vapeur à plus hautes température et pression, celle-ci est utilisée comme source de chaleur pour l'évaporation en cédant sa chaleur latente. La valorisation de l'énergie contenue dans la vapeur permet alors d'importantes économies d'énergie : 30 kWh requis pour évaporer 1 m^3 d'eau contre 800 kWh en évaporation classique.

↳ **Applications** : *concentration du lait, brassage de la bière (bouilloire à bière), concentration d'effluents, distillation, séparation.*

↳ **Potentiel** : *outre la réduction de la consommation énergétique, la RMV conduit également à une réduction importante des besoins en refroidissement (eau, tour de refroidissement) et, dans certains cas, des rejets olfactifs.*

↳ **Limites** : *la principale barrière à laquelle doit faire face la technologie réside dans sa méconnaissance au niveau industriel.*

Remarque : il est également possible d'augmenter la pression et la température de la vapeur produite par l'évaporation au moyen d'un éjecteur à vapeur. On parle alors de compression thermique de la vapeur (CTV) et, pour un investissement généralement plus faible que pour une RMV, il est parfois possible de réduire de moitié les besoins en vapeur que doit satisfaire la chaudière.

E.5. Nouveaux modes de transfert thermique

Aux traditionnelles techniques de chauffage et de cuisson des aliments dans des fours à air chaud ou par contact sur des surfaces chauffantes, s'ajoutent de nouvelles techniques à haute efficacité énergétique issues principalement des électrotechnologies : *les rayonnements infrarouges, hautes fréquences, micro-ondes, le chauffage ohmique et le chauffage par induction.*

Le principe de ces différents modes de transfert thermique varie considérablement d'un procédé à l'autre, mais ils recherchent tous un chauffage rapide et efficace du produit tout en respectant ses qualités gustatives et nutritionnelles.

Les principaux avantages de ces technologies résident dans :

- ✓ Leur rendement énergétique élevé (jusqu'à 95%) ;
- ✓ Un chauffage direct sans fluide intermédiaire ;
- ✓ Des mises en marche, arrêts et contrôles rapides ;
- ✓ Des ajustements précis de la puissance de chauffe ;
- ✓ L'absence d'huile pour les opérations de cuisson ;
- ✓ La perte minime de poids du produit.

E.5.1. L'infrarouge (IR)

Le chauffage par rayonnement infrarouge est réalisé par des résistances électriques ou des radiants au gaz naturel (céramiques) qui sont portés à la température requise (plusieurs centaines de degrés Celsius) pour émettre le type de radiation désiré ; on parle ainsi d'IR court, moyen ou long. La principale caractéristique

du rayonnement infrarouge est d'être généralement absorbé à la surface des produits, provoquant une élévation rapide de sa température.

↳ **Applications** : *cuisson et rôtissage des viandes. Cette technologie est une alternative intéressante aux procédés traditionnels qui utilisent des fours à air chaud ou des rôtissoires à huile.*

↳ **Limites** : *l'infrarouge est un procédé idéal pour le traitement de surface ou le chauffage de produits disposés en fines couches. Il ne peut donc traiter de façon homogène des produits épais et peut même conduire à leur dégradation thermique.*

E.5.2. Les micro-ondes (MO) et les hautes fréquences (HF)

Ces électrotechnologies permettent de chauffer directement, rapidement et sans intermédiaire une substance peu conductrice de l'électricité tels que les produits agroalimentaires. Bien que conduisant à des réalisations assez différentes dans la pratique, les deux technologies reposent sur le même principe : un champ électrique alternatif induit un mouvement des molécules (notamment l'eau et les graisses) qui dissipent de la chaleur. On les rencontre aussi bien pour des applications continues sous forme de tunnels que discontinus (batch) sous forme d'enceintes fermées et sont proposées par plusieurs fournisseurs d'équipements.

Les caractéristiques du traitement, notamment l'homogénéité du chauffage, dépendent de la nature du produit, de sa forme et de son épaisseur. Des études expérimentales préalables en usine pilote sont nécessaires pour définir les conditions optimales de fonctionnement. Parmi les solutions technologiques couramment rencontrées, l'application intermittente des MO ou des HF évite les surchauffes du produit alors que la mise en mouvement du produit dans l'enceinte favorise un traitement plus homogène.

↳ **Applications** *: tempérage et cuisson des aliments, contrôle bactérien des produits congelés (viandes, poissons), pasteurisation de produits emballés (produits préparés).*

E.5.3. Le chauffage ohmique

Le chauffage ohmique, que l'on rencontre également sous le nom de chauffage par effet Joule, chauffage à résistance directe, électro-chauffage ou chauffage électro-conductif, consiste à faire passer un courant électrique directement à travers le produit que l'on souhaite chauffer.

Il s'applique aux liquides raisonnablement conducteurs de l'électricité, généralement difficiles à traiter (thermosensibles, fortement visqueux, encrassants, etc.) et permet un chauffage volumique rapide dont on peut ajuster la puissance très précisément.

Les récents succès dans le développement du traitement ohmique de produits liquides ont conduit à la commercialisation des premiers équipements et relancé les travaux sur la cuisson ohmique des produits carnés.

↳ **Applications** *: chauffage et stérilisation de lait, jus de fruit, bière, sauces de viandes.*

↳ **Limites** *: à l'heure actuelle la technologie semble très difficile à appliquer aux produits solides comme les pièces de viande. Des résultats très prometteurs ont toutefois été récemment obtenus lors d'essais sur des émulsions de jambon : qualité du produit accrue et réduction jusqu'à 75% du temps de cuisson.*

E.5.4. Le chauffage par induction

Le chauffage par induction électromagnétique consiste à chauffer un produit en le plaçant dans un champ magnétique variable. Il se développe alors des courants de Foucault au sein du matériau qui provoquent son échauffement par effet Joule.

D'un point de vue technique, le chauffage peut être direct et la chaleur se développe au sein même de la masse à chauffer ou indirect et c'est une enveloppe (généralement métallique) entourant le produit qui est chauffée par induction. La faible inertie des systèmes permet un contrôle précis de la température.

↳ **Applications** *: chauffage et stérilisation de liquide (lait, jus de fruit) et de produits pâteux.*

E.6. Valves d'homogénéisation à haute efficacité

L'homogénéisation consiste à dissocier les agrégats dispersés dans une phase liquide en particules de plus petites tailles pour créer un mélange homogène et stable. L'opération est réalisée dans un homogénéisateur où le lait est contraint à passer au travers d'orifices ou valves sous l'effet de la pression.

Dans l'industrie laitière, l'homogénéisation vise à fragmenter les globules de matières grasses en plus fines particules pour les répartir de façon homogène dans tout le volume du lait. Ce traitement permet de stabiliser le produit et empêche notamment les matières grasses de remonter à la surface. Il confère également au lait des propriétés physiques et organoleptiques intéressantes pour le marché du lait de consommation et celui de la transformation en produits laitiers.

Au cours des dernières années, les fabricants d'équipements ont développé de nouvelles générations de valves à haute efficacité qui permettent de réduire la pression d'opération, et donc la consommation électrique, de 15 à 30% tout en conservant la même qualité d'homogénéisation.

↳ **Application** *: homogénéisation du lait.*

↳ **Potentiel** *: l'utilisation de valves d'homogénéisation à haute efficacité offre la possibilité de réduire la consommation énergétique en abaissant la pression d'opération (1100 psi par exemple) ou bien d'augmenter la qualité de l'homogénéisation et donc la durée de conservation du lait en opérant à la pression classique plus élevée (1350 psi).*

E.7. Exemples d'applications industrielles

Cette section illustre le potentiel qu'offrent ces nouveaux procédés au moyen d'exemples d'applications industrielles réplicables au Canada tout en identifiant les principales barrières à leur pénétration sur le marché canadien.

E.7.1. Industrie des viandes & volailles

Les viandes et les volailles nécessitent un apport énergétique important lors de leur traitement thermique (tempérage, cuisson). Parmi les technologies précédentes qui permettent de réduire significativement la consommation énergétique, *le chauffage infrarouge, le chauffage micro-ondes, le chauffage ohmique, la pasteurisation sous hautes pressions et la pompe à chaleur* présentent un grand intérêt pour l'industrie de la transformation des viandes.

Nouvelles technologies éconergétiques : principales barrières à la pénétration du marché canadien de la transformation des viandes

TECHNOLOGIES					
	Infrarouge	**Micro-ondes**	**Chauffage ohmique**	**Hautes pressions**	**Pompe à chaleur**
Prix élevé		✓		✓	
Fiabilité non éprouvée			✓		
Non accepté par USDA ou ACIA	✓				
Bénéfices non expliqués		✓			✓
Mal connu	✓			✓	✓
USDA : United States Department of Agriculture *ACIA : Agence Canadienne d'Inspection des Aliments*					

Exemples d'applications industrielles

Industrie des viandes
❶ L'infrarouge (IR)

Type d'entreprises : usine de transformation de volailles en Allemagne
usine de transformation de viandes aux Pays-Bas
Applications : cuisson de filets de poulet et cuisson de "spareribs" de porc
Date d'installation : 1998
Coûts d'investissements : non disponible

Résultats :
- *Cuisson de filets de poulet* : réduction de 78% des coûts énergétiques (gains de 68 200 $/an) tout en doublant la capacité de production (500 kg/h contre 250 kg/h auparavant)
- *Cuisson de "spareribs" de porc* : réduction de 67% des coûts énergétiques (gains de 137 400 $/an) tout en augmentant la capacité de production de 35% (950 kg/h contre 700 kg/h auparavant)

Avantages technologiques : en infrarouge, l'énergie est transmise directement au produit sans avoir recours à un fluide intermédiaire comme dans les rôtissoires conventionnelles. Le temps d'opération est plus rapide et le contrôle facilité. En outre, la cuisson par infrarouge ne nécessite plus d'huile, qui doit être régulièrement remplacée dans les procédés traditionnels, réduisant encore les coûts d'opération et l'impact environnemental.

Industrie des viandes
❷ Le traitement sous hautes pressions (hyperbare)

Type d'entreprise : usines de transformation de viande en Espagne (21 h/j)
Application : pasteurisation de jambon de porc cuit tranché et emballé sous vide (625 kg/h)
Date d'installation : 1998 (ligne de production neuve)
Coûts d'investissements : 1 400 000 $ (unité hyperbare)

Résultats : réduction des coûts énergétiques annuels de 10 500 $ (électricité : 26 kW, 6 300 h/an, 0,064 $/kWh)

Avantages technologiques : le choix du client a été basé en premier lieu sur un choix de maintien de la qualité organoleptique de son produit, ensuite l'assurance d'une "vie de tablette" d'au moins un mois et enfin sur des coûts d'opération faibles.
La pasteurisation à froid pourra remplacer le traitement thermique dans certaines applications. Ce n'est pas le cas dans le cadre de cet exemple. Le manufacturier espagnol aurait pu chauffer son produit pour obtenir la "vie de tablette" désirée mais la qualité organoleptique aurait été grandement détériorée.

Industrie des viandes
❸ Les micro-ondes (MO)

Type d'entreprise : usine de transformation de dindes aux États-Unis
Application : tempérer des dindes congelées avant transformation
Date d'installation : non disponible
Données économiques : non disponible

Résultats : les méthodes classiques pour tempérer la viande conduisaient à une perte de poids de 1% à 3% avec les procédés à l'air chaud et jusqu'à 5% pour les procédés à l'eau chaude. Cette perte de poids devient négligeable en tempérant par micro-ondes.

Avantages technologiques : en micro-ondes, l'énergie est absorbée en volume par la viande. Il n'y a pas d'énergie perdue pour chauffer un fluide intermédiaire comme dans les systèmes conventionnels à air chaud ou à l'huile et la durée de traitement est considérablement réduite.

Type d'entreprise : usine de transformation de viande aux États-Unis
Application : tempérer des quartiers congelés avant tranchage et découpe
Date d'installation : non disponible
Données économiques : non disponible

Résultats : par les méthodes habituelles (chambre de tempérage), la remontée en température à -2°C prenait entre 2 et 5 jours. Grâce à la technologie micro-ondes, cette durée est réduite à quelques minutes seulement autorisant ainsi plus de souplesse dans la gestion de la production.
La perte de produits aux opérations de tranchage et de découpe a été réduite de 20% par un meilleur contrôle des températures et une température plus homogène des produits.

Avantages technologiques : identiques à l'exemple précédent.

Industrie des viandes
❹ Le chauffage ohmique

Type d'entreprises : usines agroalimentaires en France, aux États-Unis et au Mexique
Applications : traitement thermique de sauces, œufs, jus de légumes et jus de fruits
Dates d'installation : 1995 à 1998
Données économiques : non disponible

Industrie des viandes
❺ La pompe à chaleur

Type d'entreprise : usine de transformation de volailles au Canada
Application : tempérage avant tranchage et découpe de quartiers congelés
Date d'installation : 1987
Coûts liés à la pompe à chaleur : 165 000 $ (investissement) + 9 500 $/an (fonctionnement)
Retour sur investissement : 2,9 ans

Résultats : réduction de 56 000 $/an des coûts énergétiques (production d'eau chaude et fonctionnement de condenseurs évaporatifs)

Méthodologie :
Il s'agit de récupérer et de valoriser la chaleur auparavant rejetée à l'atmosphère au niveau des condenseurs au moyen d'une pompe à chaleur (PAC) pour produire de l'eau chaude à un niveau de température utilisable au sein de l'usine.

Projet implanté :
Le 1er étage du système permet de récupérer la chaleur contenue dans le réfrigérant chaud (NH_3 en sortie d'évaporateur) utilisé par les équipements de réfrigération et de préchauffer (de 12°C à 25°C en moyenne) de l'eau au moyen d'échangeurs de chaleur en utilisant une boucle eau-glycol comme fluide intermédiaire.
Le 2ème et principal étage de récupération permet de chauffer l'eau préalablement préchauffée dans le 1er étage à l'aide d'une pompe à chaleur raccordée au circuit frigorifique du système de production de glace de l'usine fonctionnant à l'ammoniac. Le réfrigérant (R12) de la PAC récupère la chaleur de condensation de l'ammoniac et la restitue à l'eau au niveau du condenseur de la PAC.
Le système permet ainsi de produire de l'eau chaude entre 40°C et 63°C directement utilisable pour les besoins de l'usine.

E.7.2. Industrie des boissons

Les avancées technologiques en matière d'efficacité énergétique dans le secteur des boissons touchent principalement l'opération de concentration. *La filtration membranaire* et *l'évaporation à l'aide de recompression mécanique de vapeur* sont des technologies éprouvées qui offrent un très bon potentiel technico-économique.

Nouvelles technologies éconergétiques : principales barrières à la pénétration du marché canadien des boissons

TECHNOLOGIES		
	Filtration membranaire	**Recompression mécanique de la vapeur (RMV)**
Prix élevé		
Fiabilité non éprouvée		
Non accepté par USDA ou ACIA		
Bénéfices non expliqués		
Mal connu	✓	✓
USDA : United States Department of Agriculture *ACIA : Agence Canadienne d'Inspection des Aliments*		

Exemples d'applications industrielles

Industrie des boissons
❶ La filtration membranaire

Type d'entreprise : brasserie aux Pays-Bas
Applications : production de 120 000 hl/an de bières légères et sans alcool
Date d'installation : 1998
Coûts d'investissements : 270 000 $

Résultats : réduction de la consommation électrique de 550 MWh/an (35 000 $/an) et de la consommation d'eau de source de 14 400 m^3/an (30 000 $/an).
Retour sur investissement : 4,1 ans

Méthodologie :
La brasserie produit des bières légères et sans alcool à partir de bière ordinaire en éliminant tout ou en partie l'alcool du moût par osmose inverse.

Projet implanté :
Préalablement à l'installation de la nouvelle unité de séparation par osmose inverse, la brasserie retirait l'alcool de la bière au moyen de membranes planes d'une surface totale de 1000 m^2. Le procédé était énergivore et une importante quantité d'eau était extraite de la bière en même temps que l'alcool. Un volume important d'eau de source était alors utilisé par la suite pour compenser ce manque de sélectivité du système.
Le nouveau procédé utilise 960 m^2 de membranes spiralées que la bière traverse à haute vitesse et sous haute pression. Dans cette configuration, l'installation est moins encombrante, moins énergivore et plus sélective; elle permet des économies en électricité de 4,6 kWh/hl de bière et en eau de 120 l/hl de bière.

Industrie des boissons
❶ La filtration membranaire

Type d'entreprises : usines de production de jus de fruits aux États-Unis
Application : production de concentré de jus de fruits frais
Date d'installation : 14 installations de 1990 à 1999
Données économiques : non disponibles

Résultats :
Énergie thermique nécessaire à l'évaporation : 1,162 MJ/kg d'eau évaporée
Énergie électrique nécessaire pour la filtration membranaire : 0,232 MJ/kg (0,065 kWh/kg)
Réduction de 80% des besoins en énergie correspondant à une baisse de 37% de la facture énergétique (comptés à 4$/GJ de gaz, 75% d'efficacité de génération de vapeur et 0,06$/kWh électrique)

Méthodologie :
Le jus de fruit est pré-concentré par un module d'ultrafiltration suivi d'un module d'osmose inverse dont les membranes séparent sélectivement l'eau des autres constituants du jus. La concentration est ensuite poursuivie dans un évaporateur.

Projets implantés :
La concentration du jus de fruits frais est réalisée en deux étapes :
- *Le jus passe de 5% initialement à 10% de matière sèche totale après la concentration par osmose inverse.* L'opération permet d'éliminer 50 litres d'eau par 100 litres de jus frais à l'aide d'un procédé membranaire moins énergivore que le procédé par évaporation.
- *De 10% jusqu'à la concentration finale* selon la nature du jus de fruit (entre 40 et 62% de matière sèche totale). Le jus est ensuite concentré à l'aide d'un évaporateur.

Industrie des boissons
❷ La recompression thermique de la vapeur

Type d'entreprise : brasserie au Canada
Application : bouilloire à bière (volume du brassin : 700 hl)
Date d'installation : 2001
Coûts d'investissements : 400 000 $

Résultats : économie annuelle de 185 000 $ correspondant à une réduction de la consommation en vapeur de 4,2 t/h (pour utilisation de 12 h par jour, soit environ 4 300 h par an).
Retour sur investissement : 2,2 ans

Méthodologie :
Au cours du procédé de brassage, la phase d'ébullition permet de concentrer le moût à la densité recherchée, de le stériliser et d'obtenir les extraits désirés de houblon. La bouilloire est généralement chauffée par un serpentin ou une enveloppe à vapeur et les condensats sont utilisés pour produire de l'eau chaude.

Projet implanté :
Lors de l'ébullition, il se produit 10% d'évaporation. La technique de recompression de vapeur revalorise cette vapeur pour chauffer le procédé. Dans le cas présent, un thermocompresseur comprime la vapeur issue de l'ébullition du moût à l'aide de vapeur à 800 kPa. L'eau chaude alors produite peut être utilisée pour préchauffer l'appoint d'eau à la bouilloire à vapeur ou pour d'autres demandes dans le procédé.

E.7.3. Industrie de la transformation du lait

La filtration membranaire, la recompression mécanique de la vapeur (RMV), les vannes d'homogénéisation à haute efficacité et le chauffage par induction sont des technologies plus ou moins en émergence dans l'industrie de la transformation du lait. Ces dernières permettent de réduire la consommation énergétique, parfois de manière très importante, et présentent un grand intérêt pour l'industrie du lait.

Nouvelles technologies éconergétiques : principales barrières à la pénétration du marché canadien de la transformation du lait

TECHNOLOGIES				
	Filtration membranaire	**Recompression mécanique de la vapeur (RMV)**	**Homogénéi-sation haute efficacité**	**Induction**
Prix élevé				
Fiabilité non éprouvée				
Non accepté par USDA ou ACIA				
Bénéfices non expliqués		✓	✓	✓
Mal connu	✓			✓

USDA : United States Department of Agriculture
ACIA : Agence Canadienne d'Inspection des Aliments

Exemples d'applications industrielles

Industrie de la transformation du lait
❶ Les vannes d'homogénéisation à haute efficacité

Type d'entreprise : laiterie au Canada (12 h/j)
Application : homogénéisation de 20 000 l/h de lait 3,25%
Date d'installation : 2001
Coûts d'investissements : 12 900 $

Résultats : à qualité d'homogénéisation identique, réduction de la pression d'opération (114 bar contre 170 bar à l'origine) et de la puissance électrique (75 kW contre 111 kW), réduction de la consommation électrique de 132 500 MWh/an (5 300 $/an)
Retour sur investissement : 2,5 ans

Méthodologie :
Il s'agit de remplacer les vannes d'homogénéisation d'origine par des vannes à haute efficacité sur un appareil existant. Il s'agit probablement de la situation la plus fréquente étant donné que les équipements d'homogénéisation ont une durée de vie très longue.

Avantages technologiques :
Les vannes d'homogénéisation à haute efficacité permettent d'abaisser la pression d'opération et donc la puissance électrique des équipements. Outre la réduction directe de la consommation électrique, l'utilisation de nouvelles vannes plus efficaces contribue à abaisser l'appel de puissance électrique du site.

Industrie de la transformation du lait
❷ La filtration membranaire

Type d'entreprise : usine de transformation de lait au Canada
Application : concentration de lactosérum de fromage
Date d'installation : 1990
Coûts liés à la filtration membranaire : 400 000 $ (unité d'osmose inverse) + 83 000 $/an (fonctionnement)

Résultats : réduction de 90% de la consommation énergétique totale (gains de 173 000 $/an) et de plus de 95% des besoins en vapeur. La consommation électrique est accrue de 60 MWh/an (2 400 $/an) pour alimenter l'installation d'osmose inverse et les coûts de renouvellement des membranes s'élèvent à 64 000 $/an.
Retour sur investissement : 3,6 ans

Projet implanté :
Un évaporateur à triple effet standard (non équipé de recompression mécanique ou thermique de la vapeur) et alimenté par de la vapeur produite dans une chaudière est remplacé par une unité d'osmose inverse pour concentrer 12 500 l/h de lactosérum de 6% à 21% en matière sèche totale. Bien que l'unité de filtration membranaire entraîne une légère augmentation de la consommation électrique, cette technologie réduit considérablement les besoins en énergie thermique puisque la concentration se fait par séparation de l'eau à son état liquide et ne nécessite plus son évaporation.

Limite de la technologie :
La filtration membranaire a des limites d'application comme procédé de concentration. Quoiqu'il y ait certaines variations d'un fabricant à l'autre, l'osmose inverse est généralement utilisée pour des opérations de pré-concentration de lactosérum jusqu'à 25% de matière sèche totale. Pour les taux de matière sèche plus élevés, on fera appel aux méthodes classiques par évaporation.

Industrie de la transformation du lait
❸ Le chauffage par induction

Type d'entreprise : laiterie au Canada
Application : pasteurisation haute température (procédé UHT)
Date d'installation : 1996
Coûts d'investissements : 855 000 $ (unité de pasteurisation UHT)

Résultats : réduction de la consommation énergétique résultant en des économies de 259 000 $/an
Retour sur investissement : 3,3 ans

Avantages technologiques :
Par rapport aux méthodes traditionnelles de pasteurisation qui utilisent l'énergie thermique fournie par une chaudière à vapeur, le procédé par induction présente une efficacité accrue de 17%.

Industrie de la transformation du lait
❹ La recompression mécanique de la vapeur (RMV)

Type d'entreprise : usine de transformation de lait aux États-Unis
Application : concentration de lactosérum de fromage
Date d'installation : 1988

Résultats : suppression du besoin en vapeur produite par la chaudière du site et réduction de la consommation énergétique résultant en des économies de 165 000 $/an (économies en réduction de vapeur : 211 000 $/an ; coût d'opération du compresseur additionnel : 46 000 $/an).
Retour sur investissement : 4 ans

Projet implanté :
Un évaporateur à simple effet, à l'origine alimenté par de la vapeur produite dans une chaudière, est utilisé pour la concentration du lactosérum de fromage. Un compresseur centrifuge récupère la vapeur générée par l'évaporation et la porte, en la comprimant, à un niveau de température supérieur au point d'ébullition du liquide. Ainsi comprimée, la vapeur est utilisée comme source de chaleur à l'évaporateur : elle cède sa chaleur latente au contact du liquide plus froid et fournit ainsi l'énergie nécessaire à l'évaporation.

Limite de la technologie :
Bien que la RMV présente une grande efficacité énergétique, son implantation exige généralement de forts investissements qui dépendent directement de la quantité d'eau à évaporer. Ainsi, dans le cas des liquides très dilués, on aura tout intérêt à pré-concentrer la solution préalablement à son évaporation : la combinaison filtration membranaire + évaporation par RMV constitue souvent une solution très avantageuse.

F. MÉTHODES AVANCÉES D'OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE

F.1. Le "Monitoring & Targeting"
- F.1.1. Le "Monitoring & Targeting" en pratique
- F.1.2. Exemples d'application du "Monitoring & Targeting"

F.2. L'Intégration des Procédés "IP"
- F.2.1. Un pas plus loin dans l'efficacité
- F.2.2. Domaines d'application
- F.2.3. L'analyse de pincement (Pinch)
- F.2.4. L'Intégration des Procédés en pratique
- F.2.5. Exemples d'application des techniques d'Intégration des Procédés

Les évolutions récentes de l'informatique, notamment des systèmes d'acquisition de données et des logiciels d'analyse, ont permis le développement de méthodes avancées d'optimisation énergétique.
Par méthodes avancées, on parle ici d'approches rigoureuses visant l'optimisation globale d'une usine ou d'un procédé plutôt que l'amélioration sur le plan énergétique d'équipements (moteurs, compresseurs, chaudières, etc.) comme il a été principalement le cas dans les chapitres précédents.

L'auteur de ce guide, le Centre de la technologie de l'énergie de CANMET-Varennes de Ressources naturelles Canada, prône depuis plusieurs années l'utilisation d'une approche globale et rigoureuse pour l'optimisation énergétique de procédés industriels complexes. En effet, il est généralement avantageux d'améliorer les équipements en effectuant au préalable une analyse globale des besoins énergétiques d'une usine et des possibilités de récupération d'énergie au sein du procédé. De plus, le suivi régulier des paramètres de fonctionnement des procédés et de la consommation d'énergie des principaux équipements permet également l'identification d'opportunités d'économies d'énergie.

Dans le présent chapitre, deux méthodes avancées d'analyse énergétique sont présentées : le **"Monitoring and Targeting" (M & T)** et **l'Intégration des Procédés (IP)**.

Le **M & T** est une excellente approche pour gérer efficacement et de façon continue la consommation d'énergie, d'eau et de matières premières d'une usine. Cette approche permet l'identification de projets d'efficacité qui sont généralement simples et peu coûteux et ne propose pas de changement à la structure du procédé (tuyauterie, nouveaux échangeurs de chaleur, etc.). Elle peut s'appliquer à des usines de toutes tailles.

L'**IP** est une approche particulièrement performante pour analyser de façon détaillée l'ensemble des courants d'eau, d'énergie et de matières premières d'une usine. Cette approche n'est pas utilisée aussi fréquemment que le M & T qui peut s'utiliser sur une base quotidienne. Lorsqu'une étude IP est réalisée, elle est normalement valide pour plusieurs années. Une telle étude permet d'identifier des changements à la structure du procédé (modification de la topologie du procédé, nouveaux échangeurs de chaleur, cogénératrice, pompe à chaleur, etc.) et identifie des projets d'efficacité très prometteurs mais d'envergures souvent plus importantes que ceux résultant d'une approche de M & T.

Les avantages de l'IP par rapport aux autres méthodes d'analyse ou aux audits énergétiques traditionnels sont particulièrement importants pour les usines d'assez grande dimension (consommation d'énergie d'environ 1 million de dollars et plus).

En fait, le M & T et l'IP sont des approches complémentaires. L'IP permet d'analyser les flux d'énergie et de matières de façon très détaillée et propose des projets d'envergure alors que le M & T permet de gérer efficacement et de façon continue la consommation d'énergie de l'usine sur une base quotidienne, en plus de permettre l'identification de certains projets d'efficacité.

F. Méthodes Avancées d'Optimisation Énergétique

F.1. Le "Monitoring & Targeting"

"On ne peut contrôler et améliorer ce que l'on ne mesure pas"

Telle pourrait être la devise du "Monitoring & Targeting" (M&T) qui est souvent considéré comme la méthode de référence en matière de **gestion de la consommation d'énergie au quotidien**. En effet, le M & T permet de mieux comprendre où l'énergie est consommée et où les pertes sont occasionnées de façon à disposer d'informations concrètes pour accompagner un plan d'actions.

Le "Monitoring & Targeting" :

☞ *Peut conduire à des réductions de consommation énergétique de* ***5 à 25%****, généralement par des actions à faibles coûts ;*

☞ *Permet une* ***gestion active et continue*** *des consommations d'eau et d'énergie et de mesurer l'impact des mesures d'efficacité mises en oeuvre ;*

☞ *Contribue à développer une* ***culture d'efficacité énergétique*** *dans l'entreprise ;*

☞ *Favorise la maintenance préventive en fournissant des signaux d'alerte lorsqu'un équipement ne fonctionne plus correctement.*

Cette méthode, largement utilisée dans la plupart des secteurs industriels, repose sur la collecte de données ("Monitoring") relatives à l'utilisation de l'énergie dans un procédé ou une usine. Leur analyse régulière permet alors d'engager des mesures d'efficacité énergétique sur la base d'objectifs de consommation préalablement établis ("Targeting").

Le M & T est un processus systématique et continu du contrôle de la consommation d'énergie et des coûts associés. Son succès repose sur les quatre étapes suivantes qui en constituent la séquence de base :

❶ *La* ***collecte de données*** *sur la consommation d'eau et d'énergie ainsi que sur la production ;*

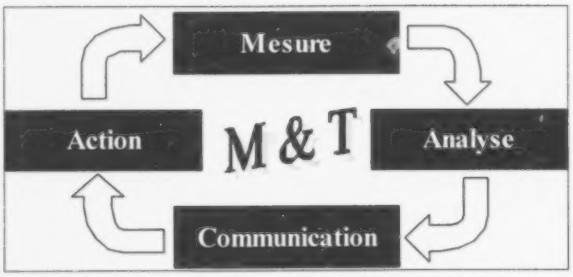
❷ *L'****analyse*** *et la comparaison des consommations spécifiques par rapport à des références (données antérieures, autres usines de taille et production comparables, moyennes sectorielles, etc.) et leur* ***interprétation*** *;*

❸ *Le* ***report*** *de l'information sous une forme adaptée (graphiques, tableaux, etc.) pour la direction de l'usine ;*

❹ *Le* ***ciblage*** *de points à améliorer et l'****implantation de mesures*** *de réduction de la consommation.*

Il est à noter que la méthode ne se limite pas seulement à l'énergie. Elle s'applique aussi à la consommation d'eau et de matières premières, la génération d'effluents liquides, etc.

F.1.1. Le "Monitoring & Targeting" en pratique



L'approche M & T nécessite avant tout le soutien de la direction de l'établissement et son engagement à traduire en actions concrètes les informations reçues du système de M & T. De plus, l'implication de spécialistes connaissant bien le site ou les procédés visés est généralement essentielle. Enfin, l'identification d'un responsable de l'énergie qui aura la responsabilité de rapporter à la direction de l'usine les résultats de l'approche M & T est également indispensable.

Il s'agit ensuite de définir les paramètres à mesurer, de choisir l'emplacement des points de mesure permettant d'identifier des centres de coûts pour mieux cibler les actions et d'installer l'instrumentation nécessaire (compteurs électriques, débitmètres, sondes de température, etc.).

Dans l'industrie agroalimentaire, les mesures portent généralement sur les consommations d'électricité, de combustible (gaz naturel, huile, etc.), d'eau, de vapeur, de matières premières et la génération d'effluents liquides. Suivant les cas, elles peuvent être utilement complétées de mesures spécifiques au niveau des procédés.

Les données recueillies sont alors reportées dans l'un des logiciels spécialisés de M & T qui existent sur le marché ou dans un chiffrier permettant d'éditer, sur une base régulière, des rapports illustrés de graphiques permettant de visualiser, faciliter la compréhension et communiquer plus facilement les résultats de l'analyse.

> *"...l'élan sera maintenu par un enregistrement régulier de la consommation et du coût des utilités"* affirme un directeur de brasserie un an après la mise en place d'un système de M & T.

Généralement, les premières mesures d'efficacité mises en œuvre sont de simples améliorations aux façons d'opérer et de contrôler le procédé, ce qui nécessite normalement peu ou pas d'investissement (cf. Partie D) mais permet de substantielles réductions de consommations tout en sensibilisant le personnel à l'utilisation rationnelle de l'énergie.

Par la suite, d'autres mesures plus coûteuses, choisies en fonction de leur retour sur investissement et de la capacité qu'a l'usine à investir, peuvent alors être implantées pour diminuer encore les consommations spécifiques et/ou la production d'effluents.

Une analyse plus globale de type "Intégration des Procédés" (cf. § F.2.), basée sur la prise en compte de l'ensemble des courants de chaleur et de matières d'un procédé ou d'une usine, peut également être envisagée car un système de M & T performant fournira la plupart des données nécessaires à une telle approche.

F.1.2. Exemples d'application du "Monitoring & Targeting"

❶ Industrie de la bière

Type d'entreprise : brasserie aux États-Unis
Coûts annuels en utilités : 1 562 000 $/an
Coûts associés au M & T : 112 000 $ (instrumentation : 65 000 $, logiciel et support : 47 000 $)

Résultats : réduction de 6,5% (95 000 $/an) des besoins en utilités
Retour sur investissement : 1,2 an

Méthodologie M & T :
Les principales activités de la brasserie ont été identifiées à des centres de coûts. 20 compteurs électriques, 4 débitmètres pour la vapeur et 16 compteurs pour l'eau et les effluents liquides ont été installés. Les résultats ont été analysés et commentés au cours de réunions hebdomadaires.

Principales mesures d'efficacité énergétique implantées :

✓ Amélioration du contrôle de la cuisson du moût
✓ Réduction de la consommation d'eau à la pasteurisation des canettes
✓ Amélioration de l'efficacité des systèmes de réfrigération et d'air comprimé
✓ Amélioration de l'efficacité des chaudières

❶ Industrie de la bière

Type d'entreprise : brasserie familiale en Angleterre
Coûts associés au M & T : 41 000 $

Résultats : réduction de 40% (73 000 m^3/an) de la consommation d'eau et de 220 000 $ des coûts annuels associés (eau, énergie et traitement des effluents)
Coûts des mesures implémentées : 203 000 $ (hors coûts du système de M & T)
Retour sur investissement : 3 mois pour 80% des résultats (13 mois pour l'ensemble des mesures)

Méthodologie M & T :
Un effort particulier a été porté à la sensibilisation du personnel et la priorité a été donnée à la consommation d'eau chaude. 16 compteurs d'eau ont été installés.

Principales mesures d'efficacité énergétique implantées :

✓ Établissement et formalisation de modes d'opération
✓ Meilleure gestion des 2 sources d'eau chaude possibles de la laveuse
✓ Réduction des fuites sur le réseau d'eau (installation de nouvelles vannes de contrôle)
✓ Installation d'une nouvelle laveuse de barils et d'une nouvelle remplisseuse

❷ Industrie de la transformation du lait

Type d'entreprise : fromagerie aux États-Unis
Coûts annuels en utilités : 2 810 000 $/an
Coûts associés au M & T : 78 000 $ (instrumentation : 23 000 $, logiciel et support : 55 000 $)

Résultats : réduction de 8% (234 000 $/an) des besoins énergétiques, de 50% de la consommation d'eau et de 10% du volume d'effluent
Retour sur investissement : 4 mois

Méthodologie M & T :
Les consommations des différents départements et procédés de la fromagerie ont fait l'objet d'un suivi rigoureux : 28 compteurs électriques et 20 compteurs pour l'eau et les effluents liquides ont été installés sur le site, la vapeur a été répartie entre 5 centres de coûts (compteurs déjà existants) et affinée au niveau de chaque évaporateur. Les rapports de suivi des différents départements et services, ainsi que des procédés les plus énergivores (évaporateurs, séchoirs), ont été analysés et commentés au cours de réunions hebdomadaires de production.

Principales mesures d'efficacité énergétique implantées :

- ✓ Amélioration de l'efficacité des chaudières à vapeur et remise en service des économiseurs
- ✓ Meilleur contrôle de l'air de combustion
- ✓ Amélioration de la gestion de l'eau
- ✓ Amélioration de l'efficacité des systèmes de production d'eau glacée
- ✓ Meilleure gestion et amélioration de l'efficacité des évaporateurs et des séchoirs

❸ Industrie de la viande rouge

Type d'entreprise : abattoir en Irlande du Nord (200 employés – 9 200 m^2)
Coûts annuels en utilités : non disponible
Coûts associés au M & T : 167 000 $ (instrumentation : 56 000 $, étude + logiciel + support : 111 000 $)

Résultats : réduction des besoins énergétiques de 7 800 GJ et de la consommation d'eau et du volume d'effluents de 18% (21 000 m^3/an)
Retour sur investissement : 11 mois pour 55% des résultats (1,7 an pour l'ensemble des mesures)

Méthodologie M & T :
En fixant des objectifs de consommation énergétique, la direction de l'usine et l'ensemble des unités opérationnelles ont été impliquées dans le projet et responsabilisées à ce programme de 3 ans.
Un système d'acquisition de données, permettant d'avoir accès à tout moment aux paramètres opératoires et consommations énergétiques de l'ensemble de l'usine et de ses principaux départements (abattage, désossage, bureaux, usines des sous-produits et matières grasses) a été mis en place : huile, électricité, vapeur, eau chaude, eau froide, effluents liquides, température dans les zones réfrigérées et les salles de travail, état (marche / arrêt) des chaudières et des équipements de réfrigération.

Principales mesures d'efficacité énergétique implantées :

- ✓ Réduction des fuites, réfection de l'isolation et rationalisation des réseaux de vapeur, d'eau chaude et d'air comprimé
- ✓ Changement de tarification électrique
- ✓ Meilleure gestion de l'eau chaude à la stérilisation des outils (eau à 82°C) et aux postes de lavage (eau à 42°C) et installation de valves d'isolement reliées au système de M & T
- ✓ Contrôle et gestion de l'ouverture des portes des zones réfrigérées
- ✓ Mise en place de panneaux de contrôle indiquant l'état de fonctionnement des équipements
- ✓ Meilleure planification du fonctionnement des équipements de réfrigération

F.2. L'Intégration des Procédés "IP"

Même si les équipements de certains procédés pris individuellement sont déjà optimisés sur le plan énergétique, une importante réduction de la consommation énergétique peut souvent être obtenue en optimisant l'utilisation des courants thermiques, qu'ils soient chauds ou froids. De plus, les procédés et grands sites agroalimentaires sont des ensembles complexes dont les diverses opérations peuvent avoir des répercussions, parfois inattendues, les unes sur les autres.

Ainsi, par une approche intégrée tenant compte des interactions et des interdépendances entre les différentes parties d'un procédé, il est possible d'obtenir des améliorations globales au moyen de mesures localisées.

L'Intégration des Procédés :

☞ *Une technologie éprouvée depuis plus de 15 ans de par le monde mais encore sous-utilisée au Canada ;*

☞ *Permet d'améliorer l'efficacité énergétique, de réduire les effluents et d'accroître la compétitivité des entreprises ;*

☞ *S'applique aussi bien à un procédé, une usine ou un site industriel ;*

☞ *Prend en compte les contraintes techniques et financières ;*

☞ *Peut conduire à des réductions de consommation d'eau et d'énergie de* ***10 à 45%*** *;*

☞ *S'applique aux sites ayant idéalement des coûts d'énergie supérieurs à 1 000 000 $/an et plusieurs opérations consommant beaucoup d'eau chaude et/ou vapeur et/ou gaz chauds.*

F.2.1. Un pas plus loin dans l'efficacité

"Un ensemble d'optimums (unités optimisées) ne constitue généralement pas l'optimum de l'ensemble (procédé complet ou usine)"

L'**Intégration des Procédés (IP)** est une technique d'analyse globale des systèmes ayant pour objectif d'identifier des stratégies permettant d'optimiser des ensembles de grande envergure à partir de la compréhension systématique des flux de chaleur et de matières. Elle permet donc d'améliorer l'efficacité énergétique, l'utilisation des matières premières, l'incidence sur l'environnement ou encore la capacité de production en profitant des interactions et des interdépendances entre les divers éléments d'un procédé, d'une usine ou d'un site de production regroupant plusieurs usines là où les méthodes traditionnelles d'intervention trouvent leurs limites. En identifiant ces interactions, il devient possible d'évaluer des projets d'efficacité et de déterminer ceux qui assurent les meilleurs résultats pour l'ensemble de l'usine.

Ainsi, au lieu de simplement tenter d'optimiser un procédé industriel en considérant isolément chacune de ses opérations unitaires séparément, l'intégration des procédés tient compte de l'ensemble de ces opérations unitaires et de leur interaction pour tirer profit des synergies inhérentes à tout système constitué de plusieurs entités œuvrant ensemble.

L'IP tient également compte des contraintes spécifiques d'une usine telles que la qualité du produit, la contrôlabilité, de même que les aspects économiques et environnementaux sans pour autant affecter ou modifier le cœur du procédé.

Il est à noter que la méthode ne se limite pas seulement à l'énergie. L'IP s'adresse également à la consommation d'eau et de matières premières, à la génération d'effluents liquides, etc.

F.2.2. Domaines d'application

Par ses besoins importants en énergie et en eau pour satisfaire les besoins de chauffage, de refroidissement et de rinçage, l'industrie agroalimentaire constitue un terrain propice aux techniques d'IP. Leur avantage, par rapport aux techniques classiques d'efficacité énergétique, est d'autant plus grand que les usines sont de taille importante.

L'IP est particulièrement adaptée aux procédés ou sites présentant plusieurs (au moins 4) courants chauds et/ou froids d'importance et ayant des coûts d'énergie supérieurs à 1 000 000 $/an.

On peut l'utiliser pour identifier des projets de :

- ✓ *Récupération de chaleur à l'intérieur du procédé ;*
- ✓ *Réutilisation de l'eau pour une consommation moindre, une réduction du volume d'effluents à traiter et une récupération de l'énergie associée ;*
- ✓ *Production simultanée de chaleur et d'électricité (cogénération) ;*
- ✓ *Désengorgement (debottlenecking) de la production ou des utilités (ex. : manque de capacité des chaudières) ;*
- ✓ *Identification des équipements et des procédés limitatifs et nécessitant des améliorations ou un remplacement.*

F.2.3. L'analyse de pincement (Pinch)

Au cours des vingt dernières années, des méthodes d'IP ont été développées et utilisées avec succès dans la plupart des secteurs industriels aussi bien dans des procédés continus que semi-continus ou discontinus. Parmi ces méthodes, l'analyse de pincement ("Pinch"), initialement développée pour l'optimisation des réseaux d'échangeurs de chaleur (pincement thermique) puis adaptée au milieu des années 1990 à l'optimisation des réseaux d'eau (pincement hydraulique), est la plus utilisée. Bien que moins largement utilisées, d'autres techniques telles que la programmation mathématique ou les systèmes experts entrent également dans le champ de l'IP et connaissent d'importants développements.

L'**analyse de pincement** permet d'aller une étape plus loin que les audits énergétiques traditionnels ou le "Monitoring & Targeting". En effet :

- ✓ *Elle permet d'évaluer rigoureusement les consommations minimales d'énergie et/ou d'eau requises pour le fonctionnement du procédé : les "valeurs cibles de consommation minimale" (target) ;*
- ✓ *Elle peut s'appliquer à un procédé, une usine ou un site industriel comprenant plusieurs usines ;*
- ✓ *Elle permet d'évaluer les effets qu'auraient d'autres configurations de réseau de chaleur et/ou d'eau ainsi que d'autres équipements sans entrer dans la conception détaillée et suggère les modifications à apporter pour se rapprocher des "valeurs cibles de consommation minimale " ;*
- ✓ *Elle fournit des indications sur les possibilités d'emplacement optimal d'unités de cogénération et de pompes à chaleur.*

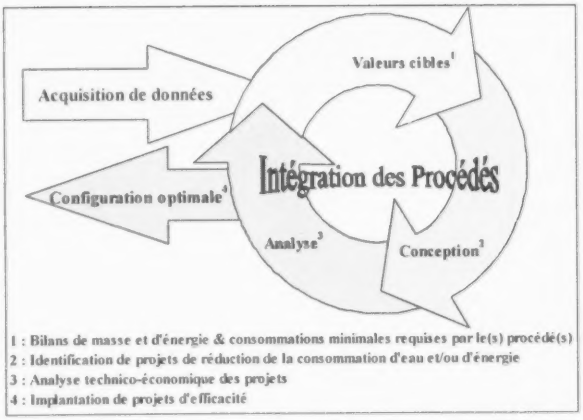
Potentiel d'économies relié à l'Intégration des Procédés :

☞ *Depuis plus de 15 ans, l'IP est appliquée avec succès en Europe et aux États-Unis mais moins fréquemment au Canada, surtout par manque de spécialistes du domaine et méconnaissance de la méthode.*

☞ *Les études d'IP menées jusqu'ici dans l'industrie des aliments et boissons ont permis d'identifier des réductions de consommations potentielles de* ***10 à 45%*** *pour l'énergie et de* ***30 à 40%*** *pour l'eau, le temps de retour sur l'investissement se situant généralement entre 0,5 et 3 ans.*

F.2.4. L'Intégration des Procédés en pratique

Une étude d'Intégration des Procédés permet l'optimisation de la consommation d'eau et d'énergie tout en tenant compte des contraintes du procédé. **Elle nécessite donc la participation du personnel de l'usine, de spécialistes en IP disposant de logiciels spécialisés ainsi que de spécialistes en procédés.** Elle repose sur quatre phases :



❶ *Collecte d'informations et représentation schématique du système étudié : digrammes d'écoulement des réseaux de chaleur, d'eau et de matières de l'usine (flowsheet) ;*

❷ ***Établissement des bilans de masse et d'énergie** dont la fiabilité conditionne la suite du processus d'optimisation des flux énergétiques et de matières ;*

❸ ***Application des techniques d'IP** (pincement thermique et/ou hydraulique, modèle mathématique) de façon à déterminer une nouvelle configuration des réseaux d'énergie et/ou d'eau permettant de réduire les consommations d'énergie et d'eau. À ce stade, **l'utilisation de logiciels spécialisés est indispensable** dans le cas de procédés complexes ;*

❹ ***Évaluation** sur le plan technico-économique de la configuration obtenue et **réitération de la phase 3** jusqu'à ce qu'un nouvel arrangement des réseaux d'énergie et/ou d'eau approprié et acceptable soit obtenu.*

L'IP est l'une des approches les plus performantes pour analyser la consommation d'énergie d'une usine et pour identifier des projets concrets de récupération d'énergie. Une usine d'envergure ayant de nombreux courants chauds et/ou froids aura tout intérêt à demander à un expert en IP d'évaluer la pertinence de réaliser une étude d'IP et le potentiel d'économie d'énergie et/ou d'eau qui pourrait en résulter[7].

[7] Pour toute information, le lecteur est invité à contacter le Groupe Intégration des Procédés du Centre de la technologie de l'énergie de CANMET–Varennes, QC (Ressources naturelles Canada) ou consulter le site http://lrdec.mets.rncan.gc.ca

Application des techniques d'Intégration des Procédés pour réduire la consommation énergétique d'une usine

Étape 1 : Quelles sont les caractéristiques des besoins énergétiques de l'usine ?

→ Des coûts d'énergie > 1 000 000 $/an dont une partie significative en combustibles fossiles

ET

→ Au moins 4 courants chauds ou froids nécessitant chacun une utilité > 500 kW

Non

→ Le potentiel de réduction de la consommation d'énergie est vraisemblablement trop faible pour justifier une étude d'Intégration des Procédés ou la complexité de l'usine est trop faible

→ Il est toutefois possible de mettre en œuvre une stratégie d'économie d'énergie par inspection à l'aide de méthodes simples, en faisant appel aux recommandations générales habituelles, le « monitoring and targeting », l'expérience et l'intuition.

Oui

Étape 2 : L'une des situations suivantes caractérise-t-elle l'usine ?

→ La capacité de production est limitée par la capacité en utilités (vapeur, eau de refroidissement, etc.)

→ La direction de l'usine a pour objectif de réduire les coûts liés à la consommation d'énergie

Non

→ Bien que le profil énergétique de l'usine puisse s'y prêter, une étude d'Intégration des Procédés semble prématurée

Collaboration entre personnel de l'usine, experts des procédés et spécialistes en Intégration des Procédés

Oui

Étape 3 : L'IP pour réduire la consommation d'énergie : une approche structurée (établissement des valeurs cibles)

→ Tracer le diagramme simplifié des réseaux d'utilités de l'usine et établir les bilans de masse et d'énergie correspondants

→ Recueillir les données caractéristiques des principales utilités nécessaires à la conduite du procédé (vapeur, eau de refroidissement, gaz spéciaux, etc.) : débits, températures, pressions.

→ Identifier les contraintes spécifiques liées à la conduite du procédé (température minimale et maximale des courants d'entrée, pression de la vapeur, possibilité de remplacer de la vapeur par de l'énergie récupérée dans le procédé, etc.)

→ Pour les procédés discontinus (batch), recueillir les durées d'utilisation de chaque équipement pour chaque type de production et chaque type de produit

→ Extraire les données clées reliées aux principaux courants chauds et froids (débits et températures) et appliquer les techniques d'Intégration des Procédés (pincement thermique) de façon à déterminer les valeurs cibles de consommation d'énergie nécessaire pour les besoins de chauffage et de refroidissement du procédé (un logiciel d'IP est requis)

→ Évaluer le potentiel de réduction de la consommation énergétique

→ Le potentiel de réduction de la consommation énergétique identifié à l'étape 3 est > 10%

Non

→ Bien que des gains soient encore possibles, le potentiel de réduction de la consommation énergétique est probablement trop faible pour justifier une analyse plus poussée d'IP

→ L'analyse des bilans de masse et d'énergie par inspection combinée à l'analyse faite à l'étape 3 est probablement suffisante pour réduire la consommation d'énergie

Oui

Collaboration entre personnel de l'usine, experts des procédés et spécialistes en Intégration des Procédés

Étape 4 : L'IP pour réduire la consommation d'énergie : une approche structurée (étape de design)

→ Identifier des modifications potentielles aux réseaux de vapeur et d'eau permettant de réduire la consommation d'énergie tout en tenant compte des contraintes du procédé et des règles de l'analyse de pincement

→ Analyser la possibilité de modifier certaines conditions d'opération ou de remplacer certains équipements qui peuvent avoir un impact sur la consommation d'énergie

→ En utilisant les règles de l'analyse de pincement, analyser la possibilité d'ajouter de nouveaux échangeurs de chaleur ou d'augmenter la capacité d'échangeurs existants pour augmenter la récupération d'énergie

→ Évaluer le potentiel d'utilisation de systèmes de cogénération ou de pompes à chaleur en utilisant les techniques d'IP et en tenant compte du contexte énergétique local

→ Discuter des modifications/projets potentiels avec le personnel de l'usine et identifier ceux qui semblent les plus intéressants d'un point de vue technique et économique

→ Calculer les réductions de consommation d'énergie correspondantes et évaluer l'impact techno-économique (nouvelles conditions opératoires, investissement, payback, etc.) Une simulation du procédé pourrait être requise, dépendant de la taille et la complexité de l'usine

Application des techniques d'Intégration des Procédés pour réduire la consommation d'eau et le volume d'effluents d'une usine

Étape 1 : Quelles sont les caractéristiques de la consommation d'eau de l'usine ?

- → Une consommation totale en eau fraîche > 50 m³/h
  ET
- → Au moins 4 courants d'eau de débit unitaire > 5 m³/h

Non

- → Le potentiel de réduction de la consommation d'eau est vraisemblablement trop faible pour justifier une étude d'Intégration des Procédés ou la complexité de l'usine est trop faible
- → Il est toutefois possible de mettre en œuvre une stratégie classique de réduction par simple inspection du réseau et en faisant appel à quelques recommandations générales, l'expérience et l'intuition

Oui

Étape 2 : Quelle(s) situation(s) caractérise(nt) l'usine ?

- → Une réduction de l'approvisionnement en eau de l'usine est à prévoir dans un proche avenir **OU**
- → La direction a pour objectif de réduire les coûts liés à l'approvisionnement en eau fraîche **OU**
- → La capacité de production est limitée par l'alimentation en eau de l'usine **OU**
- → La capacité de production est limitée par le système de traitement des effluents **OU**
- → La direction a pour objectif de réduire le coût d'un nouveau système de traitement ou les coûts de l'effluent allant à l'égout **OU**
- → L'usine doit se mettre en conformité avec une réglementation sur le rejet des effluents **OU**
- → Une grande quantité d'énergie est perdue dans les effluents

Aucune

- → Bien que la configuration du réseau d'eau puisse s'y prêter, une étude d'Intégration des Procédés semble prématurée

Collaboration entre personnel de l'usine, experts des procédés et spécialistes en Intégration des Procédés

Étape 3 : L'application des techniques d'IP pour réduire la consommation d'eau : une approche structurée

- → Sélectionner les contaminants les plus sensibles pour le procédé et présents dans les courants d'eau
- → Recueillir les données caractéristiques des principaux courants d'eau (débit, température, paramètres physico-chimiques)
- → Tracer le diagramme du réseau d'eau de l'usine et établir un bilan de masse sur l'eau et les contaminants choisis
- → Tenter de regrouper les contaminants (solides dissous, matières solides, etc.) pour réduire la complexité de l'analyse (si possible)
- → Identifier les contraintes spécifiques à chaque opération unitaire (concentrations maximales acceptables, débit maximal et minimal, etc.)
- → Appliquer les techniques d'Intégration des Procédés (pincement hydraulique) pour optimiser la réutilisation de l'eau en tenant compte des contraintes du procédé (un logiciel d'IP est requis)
- → Faire une analyse de sensibilité pour identifier les opérations unitaires dont les contraintes limitent le plus la réutilisation de l'eau. Tenter de relaxer les contraintes sur ces procédés seulement (une analyse plus détaillée pour vérifier s'il est possible de relaxer ces contraintes pourrait être requise). Réitérer l'étape précédente
- → Identifier les configurations qui semblent techniquement et économiquement les plus attrayantes pour le personnel de l'usine
- → Calculer les réductions de consommation d'eau attendues et évaluer leur impact technico-économique sur le procédé (nouvelles conditions opératoires, investissements, payback, etc.). Une simulation du procédé pourrait être requise

Étape 4 : Les réductions potentielles de consommation d'eau obtenues répondent-elles aux objectifs fixés ?

Oui

- → Modifier le réseau d'eau de l'usine suivant les mesures identifiées au cours de l'étude d'Intégration des Procédés

Non

- → Étudier les possibilités de régénération de certains courants d'eau en optimisant la mise en place de systèmes de traitement intermédiaires décentralisés (cette étape nécessite une grande expertise dans la méthodologie ainsi qu'une bonne connaissance des exigences du procédé et des caractéristiques des systèmes de traitement d'effluents)

F.2.5. Exemples d'application des techniques d'Intégration des Procédés

❶ Industrie de la bière

Type d'entreprise : brasserie aux États-unis
Coûts annuels en utilités : non disponible
Date de réalisation : 1990

Résultats : réduction des besoins en utilités de 133 000 $/an
Retour sur investissement : 10 mois

Méthodologie IP :
À la demande de la brasserie, l'étude a été limitée à l'optimisation des utilités du site (3 chaudières à vapeur de 14 t/h chacune, 1 turbine à vapeur 17 bars/3,5 bars associée à une génératrice d'électricité, 3 compresseurs pour la réfrigération) après établissement et examen de l'ensemble des besoins.

Principales mesures d'efficacité énergétique implantées :

- ✓ Meilleure planification du transfert de la bière
- ✓ Ajustement de la pression du condenseur du compresseur
- ✓ Récupération de l'énergie du condensat provenant du secteur "conditionnement"
- ✓ Récupération d'énergie aux chaudières (cheminée, purge, retour de condensat)

❶ Industrie de la bière

Type d'entreprise : brasserie (capacité : 6-12 millions d'hectolitres/an) aux États-Unis
Coûts annuels en utilités : 12 500 000 $ (80% liés à l'électricité)

Résultats : réduction de 15% (1 880 000 $/an) des besoins en utilités ; réduction de 36% (940 000 $) de la consommation de gaz et 9% de la consommation d'électricité (940 000 $)
Retour sur investissement : non disponible

Méthodologie IP :
Les opportunités d'action les plus intéressantes ont été identifiées au niveau de la gestion de l'eau chaude et du système de réfrigération de la brasserie, grands postes de consommation d'énergie.

Principales mesures d'efficacité énergétique implantées :

- ✓ Meilleure gestion de l'eau chaude
- ✓ Utilisation de sources d'eau chaude (compresseurs, vapeur d'évaporation de la bouilloire à moût, le moût chaud et les effluents)
- ✓ Meilleure gestion du système de réfrigération
- ✓ Optimisation des niveaux de température et des charges (quantités)
- ✓ Utilisation de variateurs de fréquences pour les compresseurs et moteurs de pompes

❷ Industrie de la transformation du lait

Type d'entreprise : fromagerie aux États-Unis (capacité : 68 t/j de fromage suisse et cheddar)
Coûts annuels en utilités : 1 250 000 $/an
Date de réalisation : 1991

Résultats : réduction de 25% (310 000 $/an) des coûts liés à l'énergie
Retour sur investissement : 2,5 ans

Méthodologie IP :
Depuis plusieurs années, la fromagerie s'était engagée dans un programme d'efficacité énergétique ayant conduit à des économies d'énergie significatives mais ne voyait plus de nouveaux axes d'amélioration. Après un bilan détaillé des besoins énergétiques de l'usine en matière d'électricité, de chauffage et de réfrigération, l'étude d'intégration des procédés a permis :

- De valider les mesures d'efficacité énergétique déjà mises en place par le passé (unité de Recompression Mécanique de la Vapeur pour le pré-concentrateur, unité de Compression Thermique de la Vapeur pour le 1er effet de l'évaporateur multi-effets) ;
- D'identifier de nouveaux projets d'efficacité énergétique.

Principales mesures d'efficacité énergétique implantées :

✓ Réutilisation de l'eau d'évaporation pour le NEP (Nettoyage En Place)
✓ Recyclage et réutilisation de l'air chaud des séchoirs
✓ Récupération de l'énergie dégagée par les compresseurs pour le chauffage du bâtiment
✓ Amélioration du contrôle de la réfrigération pour minimiser le rapport de compression

❸ Industrie des volailles

Type d'entreprise : usine d'abattage aux États-Unis (capacité : 20 000 poulets/h ou 260 000 poulets/j)
Coûts annuels en utilités (gaz naturel, électricité, eau) : 6 560 000 $
Date de réalisation : 1998

Résultats : potentiel de réduction des besoins en utilités (eau / effluents, réfrigération et vapeur) de 24% ou 1 600 000 $/an
Retour sur investissement : quelques mois pour des mesures produisant 40% des résultats (données non disponibles pour l'ensemble des projets)

Méthodologie IP :
L'analyse de pincement ("Pinch") a été appliquée à la consommation d'eau et d'énergie de l'usine. L'étude a été réalisée par des experts en Intégration des Procédés en étroite collaboration avec le personnel technique de l'usine suivant la méthodologie suivante : 1. Acquisition de données et établissement de bilans pour la consommation d'eau et d'énergie dans l'usine, 2. Définition du potentiel de réduction de la consommation énergétique, 3. Définition du potentiel de réduction de la consommation d'eau, 4. Identification de projets techniques permettant d'atteindre ces potentiels.

Principales mesures identifiées :

✓ Meilleure gestion et réutilisation de l'eau par des projets nécessitant de faibles investissements et rapidement implantables : réduction de la consommation d'eau de 750 à 950 m^3/j
✓ Réutilisation plus poussée de l'eau à l'aide de projets de régénération et de cascades de traitements associant un traitement UV : réduction additionnelle de la consommation d'eau de 750 à 950 m^3/j

ANNEXE 1

UNITÉS ET FACTEURS DE CONVERSION

Unités de base du Système International (SI)

Grandeur	Unité SI et symbole
Longueur	Mètre (m)
Masse	Kilogramme (kg)
Temps	Seconde (s)
Température	Kelvin (K)

Unités dérivées du Système International (SI)

Grandeur	Unité SI et symbole
Énergie	Joule (J)
Puissance	Watt (W)
Surface	m^2
Volume	m^3
Pression	Pascal (Pa)
Vitesse	m/s
Débit massique	kg/s
Débit volumique	m^3/s

Table des multiples

Multiple	Facteur multiplicatif
1 deca (da)	$= 1x10^1$
1 hecto (h)	$= 1x10^2$
1 kilo (k)	$= 1x10^3$
1 mega (M)	$= 1x10^6$
1 giga (G)	$= 1x10^9$
1 tera (T)	$= 1x10^{12}$
1 peta (P)	$= 1x10^{15}$

Facteurs de conversion : Pression

1 atmosphère = 101 325 Pa

1 pouce Hg (32°F) = 13,61 pouces H_2O (60°F)

bar	lbf/in^2	atmosphère	ft H_2O (60°F)	in Hg (32°F)
1	14,5	0,9869	33,46	29,53
$6,895 \times 10^{-2}$	1	$6,805 \times 10^{-2}$	2,307	2,036
1,013	14,7	1	33,9	29,92
$2,989 \times 10^{-2}$	0,4335	$2,950 \times 10^{-2}$	1	0,8818
$3,386 \times 10^{-2}$	0,4912	$3,342 \times 10^{-2}$	1,1341	1

Facteurs de conversion : Température

°C (Celcius)	°F (Farenheit)	K (Kelvin)	R (Rankine)
T	32 + 1,8 T	T + 273,15	1,8 (T + 273,15)
0	32	273,15	491,67
-17,78	0	255,37	459,67
100	212	373,15	671,67

Facteurs de conversion : Énergie

MJ	kWh	Btu
1	0,2778	947,8
3,6	1	3 412
$1,0545 \times 10^{-3}$	$2,931 \times 10^{-4}$	1

Facteurs de conversion : Puissance

W	Btu/h
1	3,412
0,2931	1

Facteurs de conversion : Chaleur spécifique (capacité calorifique)

kJ/kg °C	Btu/lb °F
1	0,2388
4,187	1

Facteurs de conversion : Pouvoir calorifique (massique)

kJ/kg	Btu/lb
1	0,43
2,326	1

Facteurs de conversion : Volume spécifique

m^3/kg	ft^3/lb
1	16,02
$6,243 \times 10^{-2}$	1

Facteurs de conversion : Vitesse

m/s	ft/s	km/h	mi/h
1	3,281	3,6	2,237
0,3048	1	1,097	0,6818
0,2778	0,9113	1	0,6214
0,4470	1,467	1,609	1

Autres données et facteurs de conversion utiles

Pour transformer...	En...	Multiplier par...
1 livre (lb)	kg (kilogrammes)	0,454
1 tonne (t)	kg (kilogrammes)	1 000
1 mètre-cube (m^3)	l (litres)	1 000
1 gallon impérial	l (litres)	4,547
1 gallon US	l (litres)	3,785
1 pied-cube (ft^3)	m^3	0,02832
1 m^3 de gaz naturel (@ 15 °C et 101,325 kPa)	kg	0,707
1 hp thermique (chaudière)	kW	9,810
1 hp électrique (moteur)	kW	0,746
1 thermie (Therm)	Btu	100 000
	kWh	29,31

Pouvoir calorifique des combustibles les plus usuels

Type de combustible	Pouvoir calorifique	
gaz naturel (@ 15 °C et 101,325 kPa)	37,55 10,43 53,10	MJ/m^3 kWh/m^3 MJ/kg
(données variant légèrement en fonction de la composition du gaz naturel)		
Huile n°2	38,68	MJ/l
Diesel	38,68	MJ/l
Huile n°6	41,73	MJ/l
vapeur (150 °C - 4,8 bar et condensat à 100 °C)	2 150	kJ/kg

Énergie contenue dans l'eau chaude

Eau chaude	Énergie spécifique	
Eau à 25°C (référence à10°C)	62,8	kJ/kg
Eau à 50°C (référence à10°C)	167,4	kJ/kg
Eau à 80°C (référence à10°C)	292,9	kJ/kg

ANNEXE 2

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références générales

* Documents préparés par CADDET (Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies) - Guides et études de cas :

- Maxi Brochure 02 : *Saving energy with Industrial Motors and Drives*
- Maxi Brochure 06 : *Saving energy with Efficient Compressed Air Systems*
- Maxi Brochure 13 : *Saving energy with Steam Production and Distribution*
- R162 : *Energy optimisation at a food-processing company*
- R221 : *Integrated heat recovery in a food factory*
- R232 : *Automatic air purging on a cold store refrigeration plant*
- R239 : *Refrigeration fault disgnosis system*

* *Heat recovery from discharge steam in the food industry*
CADDET Newsletter, n°1, 2000, pp.10-11

* *Integrated heating and cooling in the food and beverage industry*
CADDET Newsletter, n°2, 2000, pp.27-28

* Documents préparés par Ressources naturelles Canada (OEE - Office de l'Éfficacité Énergétique) :

- Energy Management Series 1 : *Process Insulation*
- Energy Management Series 4 : *Energy Accounting*
- Energy Management Series 6 : *Boiler Plant Systems*
- Energy Management Series 7 : *Process Furnaces, Dryers and Kilns*
- Energy Management Series 8 : *Steam and Condensate Systems*
- Energy Management Series 9 : *Heating and Cooling Equipment*
- Energy Management Series 10 : *Heating, Ventilation and Air Conditioning*
- Energy Management Series 11 : *Refrigeration and Heat Pumps*
- Energy Management Series 12 : *Water and Compressed Air Systems*
- Energy Management Series 13 : *Fans and Pumps*
- Energy Management Series 14 : Compressors and Turbines
- Energy Management Series 15 : *Measuring, Metering and Monitoring*
- Energy Management Series 19 : *Thermal Storage*
- Energy Management Series 20 : *Waste Heat Recovery*
- An Energy Efficiency and Environmental Primer for Boilers and Heaters, 2000
- Boilers and Heaters : Improving Energy Efficiency, 2001

* *Towards Energy-Efficient Refrigeration : Industrial Research and Development Opportunities to the Year 2010*
Ressources naturelles Canada, Centre de la technologie de l'énergie de CANMET, 1997

* *L'utilisation de l'eau dans l'industrie Canadienne en 1991*
Environnement Canada, Direction de la conservation de l'eau et des habitats, Ottawa, 1995

* *Instruments économiques pour la gestion de l'eau. Tarification de l'eau dans l'industrie*
Environnement Canada, Direction générale de sciences et de l'évaluation des écosystèmes, Ottawa, 1992

* *Output of Seminar on Energy Conservation in Food Processing Industry*
Organized by ECC (Energy Conservation Center) Japan and sponsored by United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and Ministry of International Trade and Industry (MITI) Japan, 1995

* Documents préparés dans le cadre de l'Energy Efficiency Best Practice Programme (EEBPP - Royaume Uni)

- ECG 66 : *Steam Generation Costs*
- FEB 2 : *Steam*
- FEB 19 : *Process Plant Insulation and Fuel Efficiency*
- GPG 2 : *Energy Savings with Motors and Drive*
- GPG 18 : *Reducing Energy Consumption Costs by Steam Metering*
- GPG 30 : *Energy Efficient Operation of Industrial Boiler Plant*
- GPG 112 : *Monitoring and Targeting in Large Companies*

- GPG 125 : *Monitoring and Targeting in Small and Medium-sized Companies*
- GPG 178 : *Cutting the Cost of Refrigerant Leakage – An introductory guide for users of small to medium-sized refrigeration systems*
- GPG 197 : *Energy Efficiency Heat Distribution*
- GPG 238 : *Heat recovery from air compressors*
- GPG 249 : *Energy Savings in Industrial Water Pumping Systems*
- GPG 251 : *Maintaining the Momentum – Sustaining Energy Management*
- GPG 272 : *Lighting for people, nergy efficiency and Architecture – An overview of lighting requirements and design*
- GPG 279 : *Running Refrigeration Plant Efficiently – A cost-saving guide for owners*
- GPG 280 : *Energy Efficient Refrigeration Technology – The fundamentals*
- GPG 283 : *Designing Energy Efficient Refrigeration Plant*
- GPCS 274 : *Insulation of Pipe Fittings*
- GPCS 338 : *Improving Efficiency by Renewing Boiler Burners and Controls*
- GPCS 339 : *Heat Recovery from Boiler Blowdown*
- NPFP 59 : *Condensing Economiser on a Gas Fired Steam Boiler*

• Documents préparés dans le cadre de Environmental Technology Best Practice Programme (ETBPP Envirowise - Royaume Uni)
- GG 154 : *Reducing the Cost of Cleaning in the Food and Drink Industry*
- GG 220 : *Low-cost Process Control in Food and Drink Processing*

• *Boiler plant and distribution system optimization manual*
H. R. Taplin, Jr., The Fairmont Press, 2nd edition, 1998, 404 pp.

• *An Energy Efficiency and Environment Primer for Boiler and Heaters*
Ressources naturelles Canada – Office de l'Efficacité Énergétique

• *InfoRecherche 2001*
Base de données sur l'efficacité énergétique
Ressources naturelles Canada – Office de l'Efficacité Énergétique – Programmes des secteurs industriel, commercial et institutionnel, 2001 (info.search@nrcan.gc.ca)

• *SuiviCEE – Logiciel de suivi coûts, énergie et émissions*
Ressources naturelles Canada – Office de l'Efficacité Énergétique

Références spécifiques à l'industrie de la bière

• *Les possibilités d'amélioration du rendement énergétique dans l'industrie brassicole canadienne*
Association des Brasseurs du Canada, 1998

• Études de cas menées au niveau mondial dans l'industrie de la bière préparées par CADDET :
- R 239 : *Refrigeration fault diagnosis system*
- R 383 : *New energy-efficient bottle cleaning machine at a brewery*

• *Precess integration study at Swiss brewery*
P. Krummenacher, F. Staine & D. Favrat, CADDET Newsletter, n°4, 1992, pp.6-9

• Documents préparés dans le cadre de l'Energy Efficiency Best Practice Programme (EEBPP - Royaume Uni)
- GPCS 273 : *Monitoring and Targeting at a brewery*

• Documents préparés dans le cadre de Environmental Technology Best Practice Programme (ETBPP Envirowise - Royaume Uni)
- GC 21 : *Improved Cask Washing Makes Large Savings*
- GG 135 : *Improved Cask Washing Makes Large Savings*

• *Information system for monitoring and targeting (M&T) of energy consumption in breweries*
D. Th. Askounis & J. Psarras, Energy, 23, n°5, 1998, pp.413-419

Références spécifiques à l'industrie des boissons douces

* Études de cas menées au niveau mondial dans l'industrie des boissons douces préparées par CADDET :
  - R 261 : *Compact immersion tubes used to pasteurise apple juice*

* Documents préparés dans le cadre de l'Energy Efficiency Best Practice Programme (EEBPP - Royaume Uni)
  - ECG 065 : *Cutting Energy Costs in the Soft Drinks Industry*

Références spécifiques à l'industrie du lait et de sa transformation

* *Guide sur les possibilités d'accroître l'efficacité énergétique dans l'industrie de transformation de produits laitiers*
Conseil national de l'industrie laitière du Canada, 1998

* Études de cas menées au niveau mondial dans l'industrie de la transformation du lait présentées par CADDET :
  - D 027 : *Anaerobic waste water treatment of a whey processing company*
  - R 050 : *Combined heat recovery and purification at a dairy*
  - R 097 : *Quadruple-effect milk evaporator uses mechanical vapour recompression*
  - R 201 : *Continuous production of small volumes in the dairy industry*
  - R 208 : *Energy efficient hardening tunnel for ice cream*
  - R 235 : *Anaerobic waste water treatment in a whey processing company*
  - R 257 : *Retrofit cogeneration system at milk processing plant*
  - R 332 : *Thickening and desalinating whey in the dairy industry*

* Documents préparés dans le cadre de l'Energy Efficiency Best Practice Programme (EEBPP - Royaume Uni)
  - GPCS 138 : *Energy monitoring and target setting at a dairy*
  - GPG 209 : *Reducing Energy Costs in Dairies. A guide to improved profitability*

* *Pinch technology applied in a dairy processing plant*
A. Marnath, B. Chezar & P. Chao, CADDET Newsletter, n°4, 1992, pp.13-15

* *Energy saving opportunities in dairy manufacturing plant*
J. E. R. Lovell-Smith & A. J. Baldwin, New Zealand Journal of Dairy Science and Technology, 1988, 23, pp. 61-74

Références spécifiques à l'industrie des viandes & volailles

* Études de cas menées au niveau mondial dans l'industrie des viandes & volailles préparées par CADDET :
  - R 149 : *Refrigeration heat recovery system*
  - R 252 : *Evaporation cooling of pig carcasses*
  - R 230 : *New air circulation system in cold smokehouses*

* *Control system minimises energy use in a meat-processing factory*
CADDET Newsletter, n°3, 2000, pp.16-17

* Documents préparés dans le cadre de l'Energy Efficiency Best Practice Programme (EEBPP - Royaume Uni)
  - CS 225 : *Energy Management at a Red Meat Plant*
  - NPFP 50 : *Anaerobic Digestion with CHP at an Abattoir*
  - GPCS 225 : *Energy Management at a Red Meat Plant*

* Documents préparés dans le cadre de Environmental Technology Best Practice Programme (ETBPP Envirowise - Royaume Uni)
  - GG 233 : *Reducing Water and Effluent Costs in Poultry Meat Processing*
  - GG 234 : *Reducing Water and Effluent Costs in Red Meat Abattoirs*
  - NC 17 : *Biotechnoloy Tackles Abattoir Waste*

Sites Internet

* Association Canadienne de l'Industrie des Boissons Gazeuses (ACIBG) : *www.softdrink.ca*
* Association des Brasseurs du Canada : *www.brewers.ca*
* Conseil National de l'Industrie Laitière du Canada (CNIL) : *www.cnil.ca*
* United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) : *www.unido.org*
* Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET) : *www.caddet-ee.org*
* Ressources naturelles Canada – Office de l'Efficacité Énergétique (OEE) : *www.oee-rncan.gc.ca*
* Ressources naturelles Canada – Centre de la technologie de l'énergie de CANMET-Varennes (CTEC - Varennes) : *lrdec.mets.rncan.gc.ca*
* Statistique Canada : *www.statcan.ca*
* Industrie Canada - Strategis : *strategis.ic.gc.ca*
* Mesures Volontaires et Registre du défi-climat canadien (MVR) : *www.vcr-mvr.ca*
* Institut Pembina : *www.climatechangesolutions.com*
* Energy Efficiency Best Practice Program (EEBPP) – Royaume Uni : *www.energy-efficiency.gov.uk*
* Environmental Technology Best Practice Program (ETBPP) – Royaume Uni : *www.envirowise.gov.uk*